



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ SANTOS

**GESTÃO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DE SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADO À REDE ELÉTRICA COM FONTES
RENOVÁVEIS.**

Recife
2021

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ SANTOS

**GESTÃO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DE SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADO À REDE ELÉTRICA COM FONTES
RENOVÁVEIS.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (EL403).

Orientador: Prof^o. M.Sc. Davidson da Costa Marques.

Recife
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

SANTOS, ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ.
GESTÃO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DE SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADO À REDE ELÉTRICA COM
FONTES RENOVÁVEIS. / ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ
SANTOS. - Recife, 2022.
63 : il., tab.

Orientador(a): DAVIDSON DA COSTA MARQUES
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2022.
Inclui referências, apêndices.

1. Fontes Renováveis.. 2. Modos de Operações.. 3. BESS.. 4.
Matlab/Simulink®.. I. MARQUES, DAVIDSON DA COSTA . (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ SANTOS

**GESTÃO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DE SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADO À REDE ELÉTRICA COM FONTES
RENOVÁVEIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (EL403).

Aprovada em: 06/01/2022

BANCA EXAMINADORA

Profº. M.Sc. Davidson da Costa Marques (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Pedro André Carvalho Rosas
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Luiz Henrique Alves de Medeiros
Universidade Federal de Pernambuco

*"Tudo tem seu tempo determinado, e há tempo
para todo propósito debaixo do céu".
Eclesiastes 3, 1-2.22*

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente à Deus, por ter me concedido resiliência, sabedoria, fé e força de vontade durante todo o período da graduação em engenharia elétrica.

Agradeço de modo especial aos meus pais Antonio e Karolina, a minha avó Carmem, que sempre batalharam e se esforçaram para me concederem todo o suporte necessário para que eu pudesse concluir minha graduação longe de casa. O apoio de vocês foram crucial para que eu superasse todos os obstáculos superados até esse momento.

Agradeço meus amigos João Pedro, Felipe, Vitor, Cícero, Leonardo, Luan, Renan, Rayssa, Joás, Duda, Matheus, Heitor e Vinicius, que dividiram comigo todos os momentos de alegrias e de angústias durante a graduação, tornando o fardo mais leve.

Agradeço ao meu orientador, professor Davidson Marques, que sempre esteve ao meu lado durante todo o período de desenvolvimento do trabalho. Seu apoio foi fundamental para meu crescimento profissional e pessoal. Obrigado por todos os ensinamentos.

Também agradeço, em nome de professor Pedro Rosas, todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE que contribuíram para minha formação em engenharia elétrica.

RESUMO

O crescimento da inserção de fontes de energia renovável (RES – *Renewable Energy Sources*) em larga escala, como eólica (EOL) e solar-fotovoltaica (FV), ocasiona impactos que afetam no comportamento da rede elétrica. Estes impactos são decorrentes da variabilidade presente nas gerações eólica e solar, tornando-as fontes de energias não despacháveis. Uma das possíveis formas para solucionar os impactos das RESs é utilizar os sistemas de armazenamento de energia (ESS – *Energy Storage System*). Os ESSs são componentes capazes de absorver e injetar potência para atender determinada condição de operação do sistema ao qual está conectado. Com o ESS, há a possibilidade de utilizá-lo para exercer modos de operações que são capazes de auxiliar na integração das RESs e funcionamento da rede elétrica. No trabalho, serão apresentados três modos de operações para o sistema de armazenamento: *Peak Shaving* (Corte de Pico), *Surplus Energy* (Energia Excedente) e *Ramp Rate Control* (Controle de Taxa de Rampa). Para implementar os modos de operações, será representado no software Matlab/Simulink® um sistema elétrico com a presença de: geração FV, cargas e sistemas de armazenamento por meio de baterias (BESS – *Battery Energy Storage System*), tendo como referência o laboratório de armazenamento e mobilidade (LAM). Definidas as características do sistema para simulação, serão exibidos os resultados obtidos para os cenários de cada modo de operação e suas respectivas análises. Por fim, o trabalho apresentará alguns pontos complementares que poderão ser utilizados para elaboração de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Fontes Renováveis. Modos de Operações. BESS. Matlab/Simulink®.

ABSTRACT

The growth in the insertion of renewable energy sources (RES - Renewable Energy Sources) on a large scale, such as wind (EOL) and solar-photovoltaic (PV), causes impacts that affect the behavior of the electricity grid. These impacts are due to the variability present in wind and solar generation, making them non-dispatchable energy sources. One of the possible ways to solve the impacts of RESs is to use energy storage systems (ESS – Energy Storage System). ESSs are components capable of storing, absorbing and injecting power and supplying energy to meet a certain operating condition of the system to which it is connected. With the ESS, there is the possibility of using it to exercise modes of operations that are capable of assisting in the integration of RESs and operation of the electrical network. In the work, three operating modes for the storage system will be presented: Peak Shaving, Surplus Energy and Ramp Rate Control. To implement the operating modes, an electrical system will be represented in the Matlab/Simulink® software with the presence of: PV generation, loads and storage systems through batteries (BESS - Battery Energy Storage System), having as reference the laboratory of storage and mobility (LAM). Once the characteristics of the system for simulation are defined, the results obtained for the scenarios of each operating mode and their respective analyses will be displayed. Finally, the work will present some complementary points that can be used for the elaboration of future works.

Keywords: Renewable Sources. Modes of Operations. BESS. Matlab/Simulink®.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Redução dos custos das fontes PV e EOL.....	14
Figura 2: Crescimento da geração FV no Brasil	15
Figura 3: Crescimento da geração EOL no Brasil	15
Figura 4: Projeção do crescimento da capacidade instalada por fonte	16
Figura 5: Representação do LAM.....	17
Figura 6: Aplicações do ESS de acordo com energia, potência e duração da descarga.	20
Figura 7: Nível de potência e tempo de descarga para cada tipo de ESS.....	20
Figura 8: Representação do modo de operação <i>Peak Shaving</i>	21
Figura 9: Representação do modo de operação <i>Surplus Energy</i>	22
Figura 10: Intervalo para o cálculo de RR.	23
Figura 11: Técnicas de suavização de PV utilizando o controle de RR.....	24
Figura 12: Sistema de Armazenamento de Energia	25
Figura 13: Formas de armazenamento de energia.....	26
Figura 14: Layout ilustrativo do BESS	27
Figura 15: Representação esquemática da célula presente no BESS	27
Figura 16: Tecnologias de BESS.....	28
Figura 17: Capacidade instalada de armazenamento de baterias de Li-íon.....	29
Figura 18: Sistema elétrico representado no Matlab/Simulink®	30
Figura 19: <i>Three-Phase Dynamic Load</i>	31
Figura 20: Software PVSOL	32
Figura 21: Localização da instalação dos painéis solares.....	32
Figura 22: Cálculo do SOC (%)	34
Figura 23: BESS presente no laboratório.	34
Figura 24: Fluxograma do modo de operação <i>Peak Shaving</i>	36
Figura 25: Ilustração da energia excedente da geração FV	37
Figura 26: Fluxograma do modo de operação <i>Surplus Energy</i>	37
Figura 27: Exemplo de flutuações na geração FV.....	38
Figura 28: Fluxograma do modo de operação <i>Ramp Rate Control</i>	40
Figura 29: Carga para Cenário A	41
Figura 30: Carga para cenário B	42
Figura 31: Cenário A para modo de operação <i>Peak Shaving</i>	43

Figura 32: SOC para cenário A do modo <i>Peak Shaving</i>	43
Figura 33: Cenário B para modo de operação <i>Peak Shaving</i>	44
Figura 34: SOC para cenário B do modo <i>Peak Shaving</i>	45
Figura 35: Geração solar para o modo de operação <i>Surplus Energy</i>	46
Figura 36: Cenário A para modo de operação <i>Surplus Energy</i>	47
Figura 37: SOC para cenário A do modo <i>Surplus Energy</i>	47
Figura 38: Cenário B para modo de operação <i>Surplus Energy</i>	48
Figura 39: SOC para cenário B do modo <i>Surplus Energy</i>	49
Figura 40: Cenário A para modo de operação Ramp Rate Control.	50
Figura 41: Cenário B para modo de operação Ramp Rate Control.	50
Figura 42: Suavização para o cenário A.....	51
Figura 43: SOC para suavização do cenário A.....	52
Figura 44: Suavização para o cenário B.....	53
Figura 45: SOC para suavização do cenário B	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações do ESS	19
Tabela 2: Vantagens e Desvantagens das células de Li-íon	29
Tabela 3: Especificações técnicas do sistema FV	33
Tabela 4: Especificações técnicas do BESS	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EOL	Energia Eólica
EMA	<i>Exponential Moving Average</i>
FV	Energia Solar-fotovoltaica
LAM	Laboratório de Armazenamento e Mobilidade
LPF	<i>Low-Pass Filter</i>
MA	<i>Moving Average</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
PCS	<i>Power Conversion System</i>
RR	<i>Ramp Rate</i>
RES	<i>Renewable Energy Source</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
SIN	Sistema Interligado Nacional
2 - LPF	<i>Second Order Low-Pass Filter</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Objetivo Específico	18
1.4	Organização Textual.....	18
2	ESTADO DA ARTE (FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA)	19
2.1	Modos de Operação do ESS	19
2.1.1	Peak Shaving	21
2.1.2	Surplus Energy	22
2.1.3	Ramp Rate Control	23
2.2	Sistemas de Armazenamento de Energia	25
2.2.1	Armazenamento de Forma Eletroquímica	26
3	METODOLOGIA	30
3.1	Modelo PQ no <i>Simulink</i> /Matlab	31
3.2	Sistema de Geração Solar	31
3.3	Modelo do BESS no <i>Simulink</i> /Matlab.....	33
3.4	Peak Shaving	35
3.5	Surplus Energy	36
3.6	Ramp Rate Control	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Cenários para modo de operação <i>Peak Shaving</i>	41
4.2	Cenários para modo de operação <i>Surplus Energy</i>	45
4.3	Cenários para modo de operação <i>Ramp Rate Control</i>	49
5	CONCLUSÃO	55
5.1	Trabalhos Futuros	55
	REFERÊNCIAS	57

APÊNDICE A.....	61
APÊNDICE B.....	62
APÊNDICE C	63

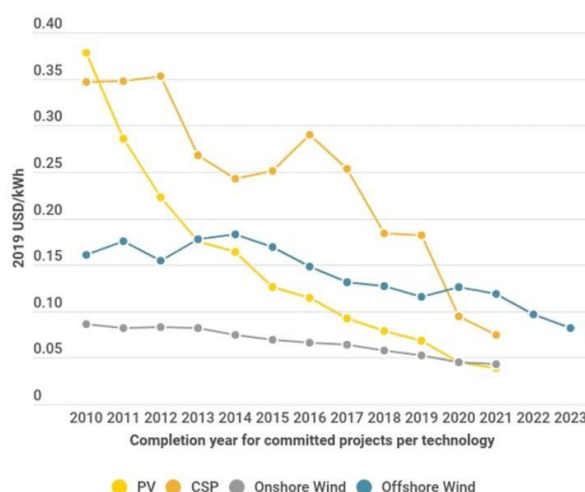
1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A inserção de fontes de energia renováveis (RES – *Renewable Energy Source*) na matriz energética tornou-se um fator determinante para o mundo avançar no processo de redução das emissões de dióxido de carbono. As fontes de geração energia eólica (EOL) e energia solar – fotovoltaica (FV) têm se destacado entre as fontes renováveis por apresentarem viabilidade econômica decorrente da tendência de redução dos custos, possibilitando a inserção no sistema elétrico (Yongheng Yang, 2019).

A redução do custo é um fator relevante no estímulo do crescimento da capacidade instalada de fontes FV e EOL, podendo ser observado na Figura 1 o decrescimento dos custos dessas fontes.

Figura 1: Redução dos custos das fontes PV e EOL.



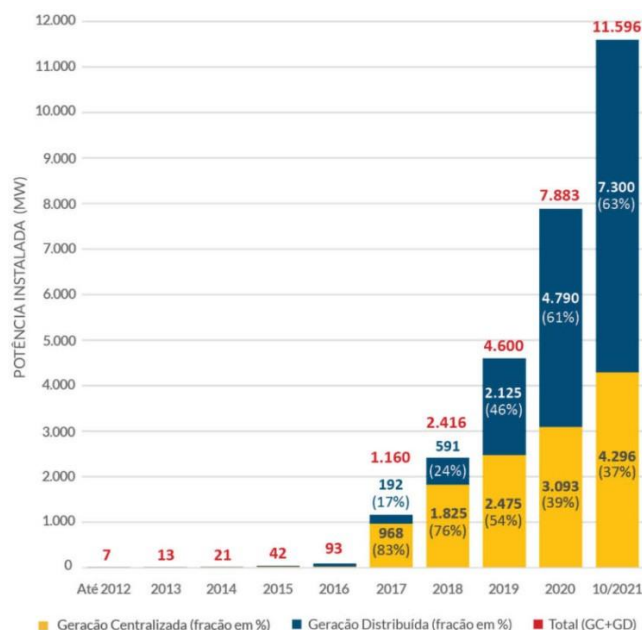
Fonte: (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2020)

No Brasil, a maior parte de energia produzida provém das usinas hidroelétricas, mas nos últimos anos, a geração de energia eólica e solar vem ganhando destaques. De fato, o crescimento na matriz de energia limpa contribuirá para o país honrar o compromisso assumido na Cúpula do Clima 2021 com o intuito de neutralidade climática de 2060 para 2050.

De acordo com os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) de EOL representa 11,4% da matriz elétrica brasileira em 2021 e a expectativa é chegar aos 13,9% ao fim de 2025, enquanto a FV corresponde 2,6% em 2021, podendo atingir 4,7% até o fim de 2025 (MME,

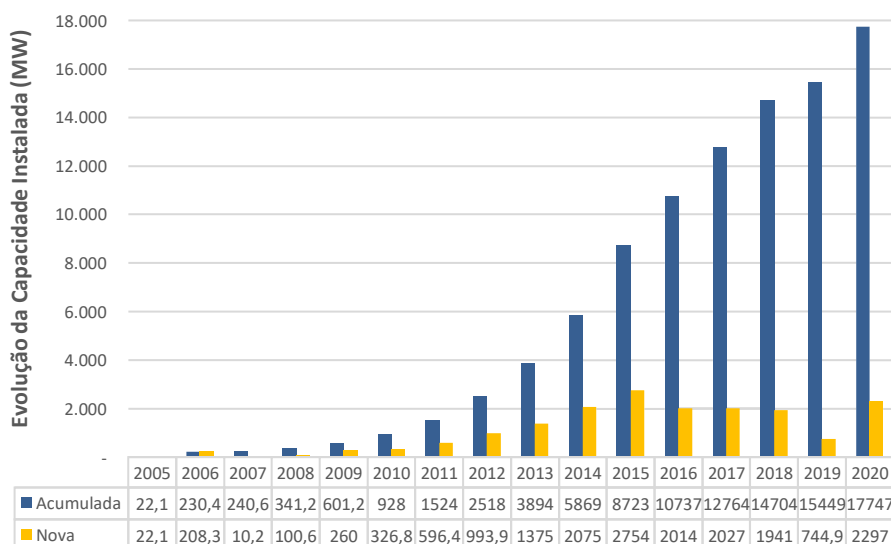
2021). As Figura 2 e Figura 3 mostram, respectivamente, a evolução das fontes FV e EOL no Brasil.

Figura 2: Crescimento da geração FV no Brasil.



Fonte: (ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2021)

Figura 3: Crescimento da geração EOL no Brasil.

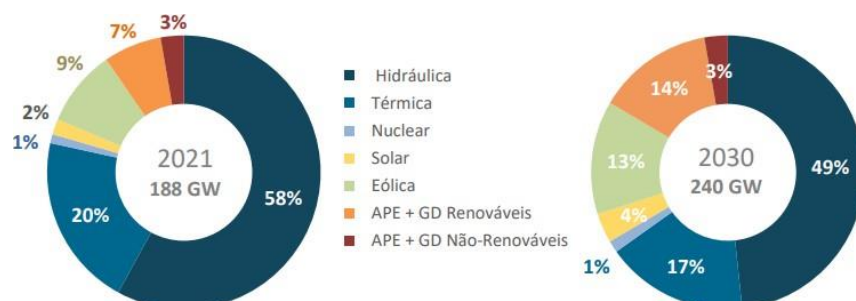


Fonte: Adaptado de (ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica.)

Os estudos realizados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) revelam a queda no custo das gerações FV e EOL no plano PNE (Plano Nacional de Energia) 2050 (EPE - PEN2050) e a projeção do crescimento da capacidade instalada das fontes PV e EOL na

matriz elétrica Brasil de acordo com o PDE (Plano Decenal de Expansão de Energia) 2030 (EPE - PDE 2030), mostrado na Figura 4.

Figura 4: Projeção do crescimento da capacidade instalada por fonte.



Fonte: (EPE - PDE 2030)

A evolução da capacidade instalada e o crescimento de fontes renováveis (PV e EOL) geram impactos capazes de afetar na estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico. A origem dos impactos está atrelada ao comportamento das gerações PV e EOL, como: intermitência (resultante da variabilidade de vento e irradiação), incerteza de prever a geração e definição do local para instalação. (Falko Ueckerdt, 2015) (Joseph Oyekale, 2020)

Em consequência do comportamento de geração das RESs é possível elencar alguns impactos que afetam na operação do sistema, tais como: instabilidade de tensão e frequência, custo operacional para manter o equilíbrio entre a geração e demanda, necessidade de reserva girante, custo com transmissão para deslocar energia até a carga, potência de saída não despachável, etc. (Falko Ueckerdt, 2015) (Joseph Oyekale, 2020)

Uma das soluções para mitigar os impactos ocasionados pela inserção RESs é utilizar os sistemas de armazenamentos de energia (*Energy Storage System – ESS*). Dentre os ESSs, o sistema de armazenamento de energia por meio de bateria (*Battery Energy Storage Systems – BESS*) é capaz de fornecer modos operacionais que são fundamentais para ampliar ainda mais a participação de RESs.

Para desempenhar serviços que auxiliam na operação do sistema o BESS pode ser aplicado no gerenciamento e qualidade de energia, como: controle de frequência, controle de tensão, suavizar a potência saída (*Ramp Rate Control*), armazenar o excesso de geração da RESs, serviços de *back start* (quando há falta da rede), alívio de congestionamento (aliviar o fluxo de potência das linhas de transmissão e distribuição em

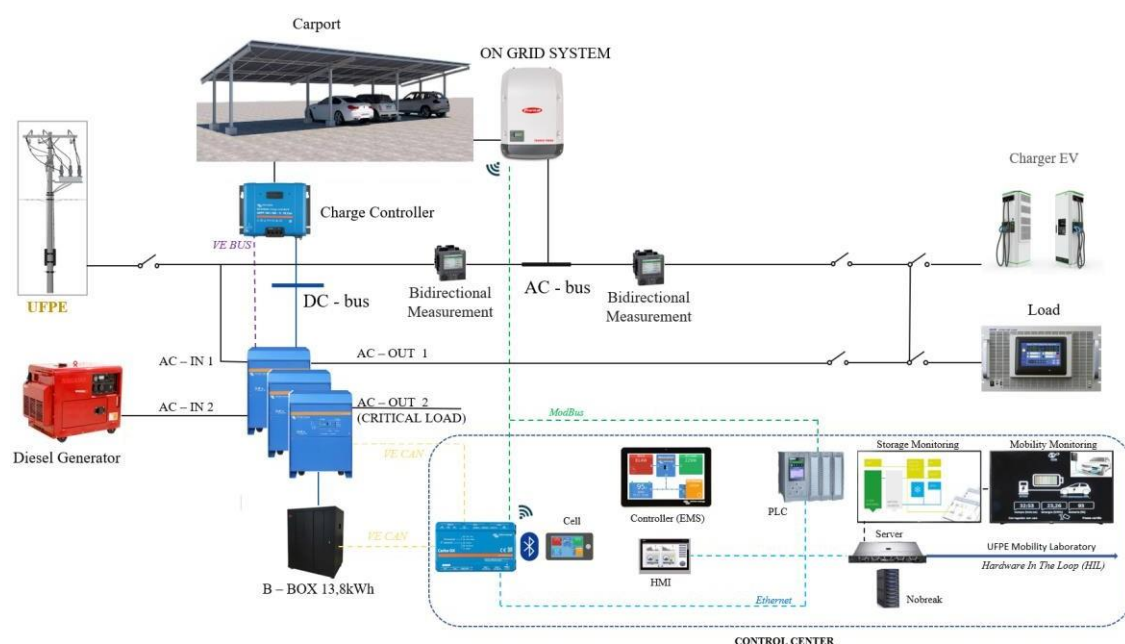
momentos de alta demanda), *Peak Shaving* (corte de pico), etc. (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2019).

No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou o primeiro projeto de BESS de Lítio com potência instalada de 30MW, desenvolvido pela ISA CTEEP. O intuito desse projeto, é utilizar o BESS para auxiliar a rede elétrica em momentos de pico de consumo, evitando interrupções no fornecimento de energia. Esse serviço assegura o aumento da confiabilidade do sistema. (ISA CTEEP, 2021)

Alinhado com a integração das RESs e perspectiva de utilizar o BESS para contribuir na operação da rede elétrica, o Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) em parceria com CPFL foi contemplado com a concepção do laboratório de armazenamento e mobilidade (LAM) a partir do projetos intitulados: PD-0397-3026/2017 - "Inserção de Sistema de Armazenamento em Configurações Múltiplas para Suporte à Geração Eólica" e CS3059 – Desenvolvimento de um sistema para carregamento veicular com integração de um sistema solar fotovoltaico; tendo em vista a grande oportunidade da pesquisa em diferentes aplicações utilizando BESS em escala reduzida.

O objetivo do LAM será simular condições de operação do BESS integrado a sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid* - que serão instalados em uma estrutura *Carport* – cargas e uma estação de carregamento para veículos elétricos, como apresentado na Figura 5. A concepção do laboratório foi um ponto importante para motivar o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 5: Representação do LAM.



Fonte: Próprio Autor.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo de geral deste trabalho é analisar os modos de operações do BESS conectado a um sistema elétrico com a presença de fonte FV e cargas (variáveis e/ou fixas).

1.3 Objetivo Específico

Tem como objetivo específico:

- Apresentar uma revisão bibliográfica de sistemas de armazenamentos com intuito de mitigar as perturbações na rede elétrica decorrente da inserção de RESs;
- Apresentar os modos de operações do BESS: *Peak Shaving*, *Surplus Energy* e *Ramp Rate Control*;
- Desenvolver um modelo computacional que represente o sistema do LAM;
- Realizar simulações utilizando os programas computacionais Matla/Simulink® e PVSOL com intuito de analisar os modos de operações e cenários propostos.

1.4 Organização Textual

O trabalho desenvolvido e o conteúdo produzido no presente Trabalho de Conclusão de Curso são estruturados em cinco capítulos. Após a parte introdutória, o trabalho segue a seguinte estrutura:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os modos de operações e as tecnologias dos sistemas de armazenamento;
- Capítulo 3: Definição da metodologia para desenvolver os modos de operações do BESS: *Peak Shaving*, *Surplus Energy* e *Ramp Rate Control*. Além disso, representar como foi realizada a simulação nos softwares Matla/Simulink® e PVSOL;
- Capítulo 4: Apresentação dos cenários e resultados para os modos de operações definidos do Capítulo 3;
- Capítulo 5: Conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE (FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA)

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica dos modos de operação do ESS que serão implementados no ambiente computacional, mencionando em qual setor do sistema elétrico se torna viável sua aplicação. Além disso, identificar de forma sucinta quais os tipos de tecnologias existentes de armazenamento de energia, com ênfase na tecnologia de lítio.

2.1 Modos de Operação do ESS

Os modos de operação do ESS podem ser utilizados nos principais setores do sistema elétrico: geração, transmissão, subestação, distribuição e consumidor final (carga). Dessa forma, é possível definir as categorias nas quais o sistema de armazenamento pode atuar, sendo elas, suprimento de carga, serviços ancilares, suporte da transmissão e distribuição, serviços atrás do medidor e integração à renováveis. (Rachel Carnegie, 2013) (Silva, 2018)

A Tabela 1 mostra as categorias e as respectivas aplicações (modos de operações) do ESS.

Tabela 1: Aplicações do ESS.

Suprimento de energia	Serviços ancilares	Suporte da transmissão e distribuição	Serviços atrás do medidor	Integração à renováveis
Time-shift	Regulação de tensão	Postergação	Time-shift	Time-shift
Capacidade de fornecimento de energia	Regulação de frequência	Alívio de Congestionamento	Confiabilidade	Regulação de frequência
			Controle da demanda	Regulação de frequência
			Qualidade de energia	Suavização da saída (<i>Ramp Rate - RR</i>)

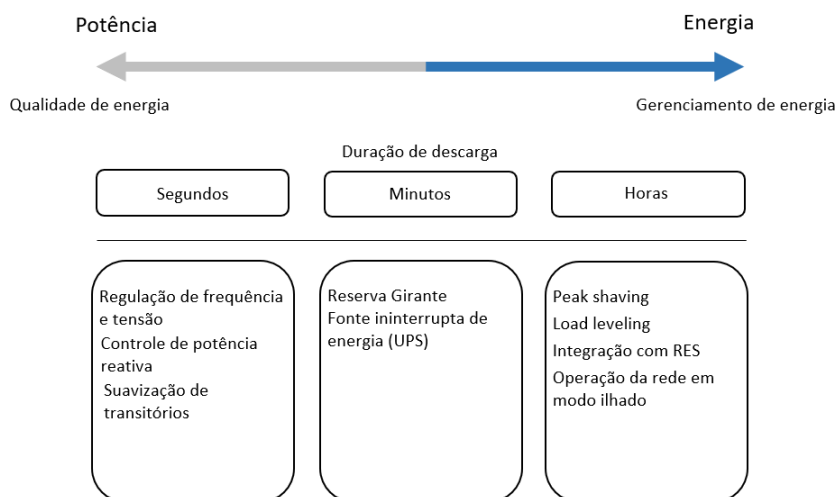
Fonte: Adaptado de (Silva, 2018)

De acordo com a Tabela 1, o ESS pode exercer diversas aplicações no sistema elétrico. Porém, os ESSs disponíveis apresentam melhor desempenho em algumas funções específicas a depender da tecnologia.

A escolha do ESS mais adequada para aplicação de função desejada, é necessário analisar as seguintes grandezas: energia (quantidade total de potência entregue ao sistema durante um determinado período, medido em Watt-hora Wh), potência (taxa de variação

que a energia sofre durante um intervalo de tempo, medido em Watt - W) e duração do tempo de descarga (tempo necessário para executar determinada aplicação). A Figura 6 apresenta a classificação das aplicações do sistema de armazenamento. (Silva, 2018)

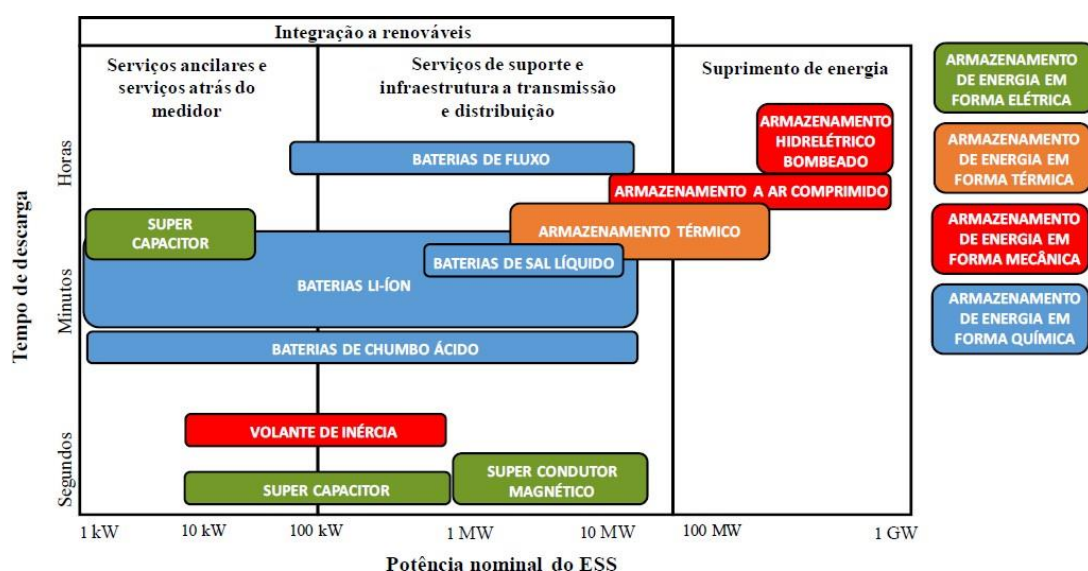
Figura 6: Aplicações do ESS de acordo com energia, potência e duração da descarga.



Fonte: Adaptado de (Maria C.Argyroua, 2018)

Já a Figura 7 ilustra a possibilidade de definir a aplicação do ESS de acordo com nível de potência e duração de tempo de descarga.

Figura 7: Nível de potência e tempo de descarga para cada tipo de ESS.



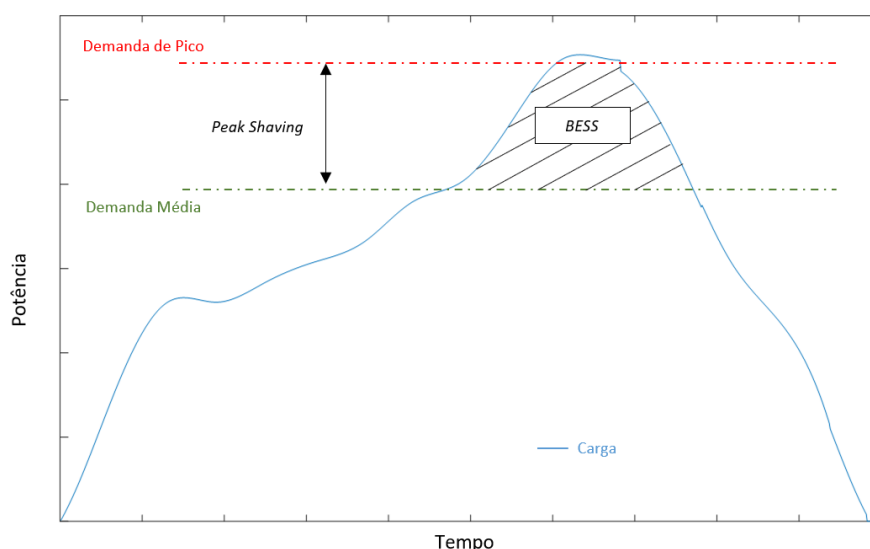
Fonte: (Silva, 2018)

Dentre as funções citadas na Tabela 1 e Figura 6, o trabalho abordará as seguintes modos de operações: *Peak-Shaving*, suavização da saída (*Ramp Rate Control*) e *Surplus Energy*, as quais serão apresentadas em sequência.

- **Peak Shaving**

A função pode ser aplicada a consumidores industriais e comerciais que possuem um perfil de carga que representa um pico da demanda superior a demanda média e as tarifas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência são diferentes ao longo do dia, como exemplo a Figura 8.

Figura 8: Representação do modo de operação *Peak Shaving*.



Fonte: Próprio Autor.

Como visto na Figura 8, o momento que ocorre a demanda máxima (demanda de pico) é necessário que as concessionárias tenham uma estratégia capaz de atender esse pico de demanda, para garantir o equilíbrio entre geração e consumo. No entanto, a concessionária atribui custos operacionais (geração, transmissão e distribuição) para acompanhar a demanda máxima, que são repassados aos clientes na forma de encargos de demanda e consumo. (Kein Huat Chua, 2016)

Nesse contexto, uma das estratégias mais comum da função *Peak Shaving* é descarregar o BESS durante os horários de pico (tarifação alta) e carregar no momento de baixa demanda (fora do pico), acarretando a redução do pico de carga.

Na literatura, há diversas estratégias para reduzir o pico de demanda. Segundo (Kein Huat Chua, 2016) o trabalho propõe um método de otimização capaz de determinar a capacidade ideal para o armazenamento de energia e a definição da potência dos inversores com base no perfil de carga do cliente.

Já em (Oudalov, Cherkaoui, & Beguin., 2008) foi usado uma metodologia baseada em programação dinâmica onde o objetivo é maximizar o benefício econômico do cliente com um BESS de capacidade mínima, levando em consideração as restrições físicas da bateria.

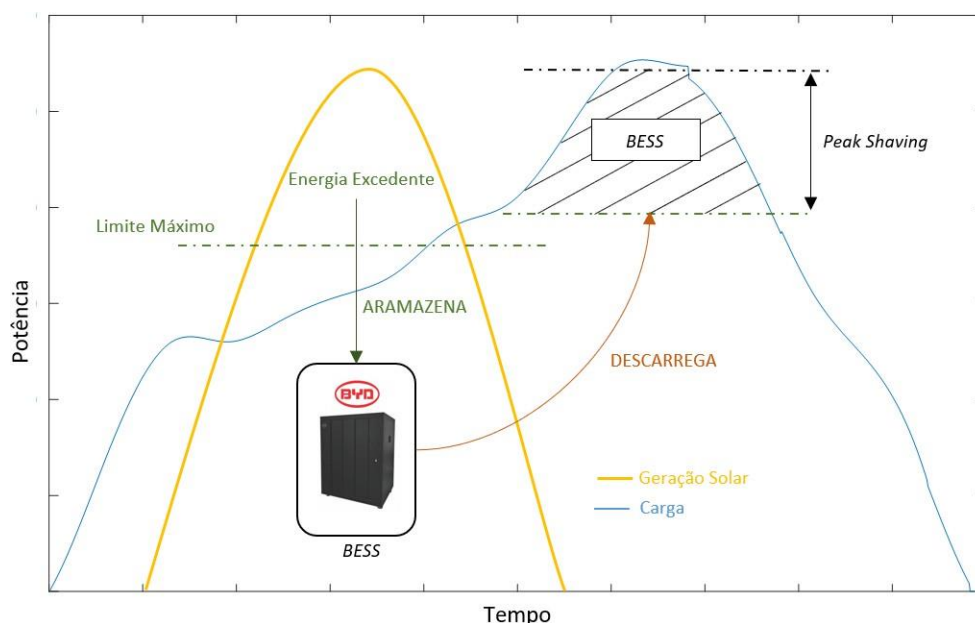
- **Surplus Energy**

Para um sistema composto por geração fotovoltaica, BESS e carga - conectados à rede elétrica - é possível utilizar a função a *Surplus Energy* (energia excedente). Essa função consiste em determinar soluções de gerenciamento para energia excedente produzida pela instalação fotovoltaica não injetada na carga e/ou na rede. (TAVARES, 2015).

Para aproveitamento da energia excedente, é necessário definir uma potência limite na qual a geração fotovoltaica não poderá exceder, caso essa potência limite seja ultrapassada, o excesso de geração será utilizado para carregar o BESS.

Posteriormente ao carregamento do BESS a energia será despachada para auxiliar no suprimento de uma determinada solicitação de carga, exemplificado na Figura 9.

Figura 9: Representação do modo de operação *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

Outras hipóteses para aproveitar o excesso de energia desenvolvidas em (TAVARES, 2015) são: (1) utilizar para carregar o BESS e posteriormente suprir a carga

em momento em que não há mais geração fotovoltaica e (2) despachar a energia para rede elétrica.

De acordo com (M.S. Ismail, 2014), a aplicação *Surplus Energy* também tem potencial de diminuir o custo de produção de energia em sistemas com a presença de fontes renováveis.

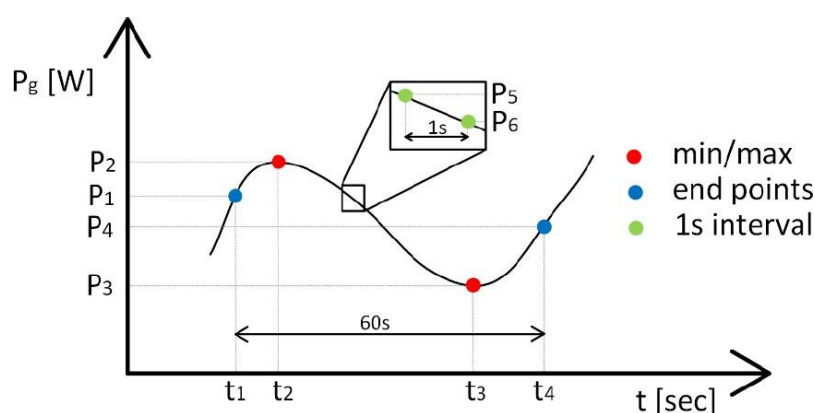
- **Ramp Rate Control**

As flutuações de energia existentes na geração FV são decorrentes da variabilidade de irradiância solar no decorrer do dia e esse comportamento tem influência na operação da rede elétrica. Para mitigar essas variações, é possível gerenciar o sistema de armazenamento de energia para desempenhar a função *Ramp Rate Control*.

Para o gerenciamento da função é preciso definir uma variação de potência máxima de modo que a geração fotovoltaica não poderá ultrapassar o limite estabelecido, denominado taxa de rampa (*Ramp Rate* - RR). Caso a geração ultrapasse a variação máxima, o controle do BESS fornece uma potência de referência capaz de suavizar as flutuações para o valor desejado. (João Martins, 2019)

A literatura apresenta diversos métodos que definem o cálculo de RR, dentre eles: a diferença entre dois pontos da curva de energia em um intervalo de 60 segundos, a diferença entre as potências mínima/máxima em um intervalo considerado e a diferença entre dois pontos no intervalo de um segundo. Essas metodologias são ilustradas na Figura 10. (João Martins, 2019)

Figura 10: Intervalo para o cálculo de RR.



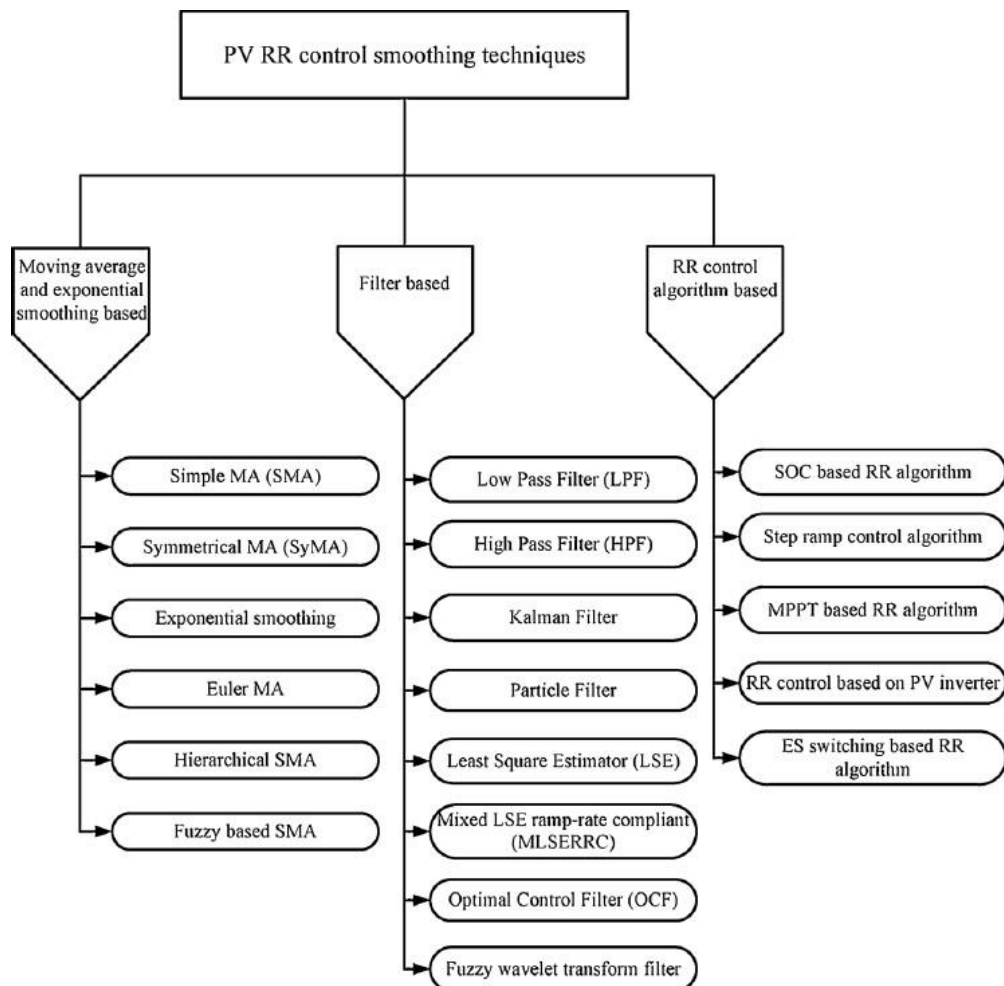
Fonte: (João Martins, 2019)

Em (João Martins, 2019) são apresentados e analisados quatro métodos de suavização de potência: média móvel (Moving Average - MA), média móvel exponencial (Exponential

Moving Average - EMA), filtro passa-baixa (Low-pass filter - LPF) e filtro passa baixa de segunda ordem (Second order low-pass filter - 2 LPF).

Outro estudo elenca também as técnicas de suavização de controle de RR, categorizando-as da seguinte forma: MA e métodos com base na suavização exponencial, métodos a partir de filtro e métodos fundamentados em algoritmos de controle de RR, conforma Figura 11. A técnica mais utilizada para mitigar as flutuações de PV é a MA devido a sua facilidade de implementação e baixo esforço computacional. (Shivashankar Sukumara, 2018)

Figura 11: Técnicas de suavização de PV utilizando o controle de RR.



Fonte: (Shivashankar Sukumara, 2018)

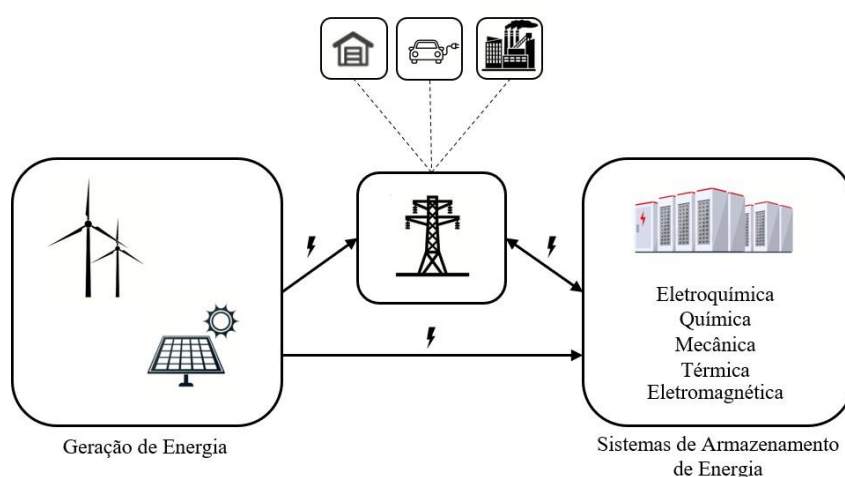
2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os dispositivos armazenadores de energia são similares a qualquer outra fonte baseada em inversores, exceto pelo fluxo de potência bidirecional (Erickson, 2009). Dentre as estruturas de armazenamento energético, que podem ser de vários tipos, entre os quais se destacam: Volante de inércia, Banco de baterias (chumbo-carbono, íon de lítio, sulfeto de sódio etc.), Supercapacitores, veículos elétricos etc. (P. Medina, 2014)

A estrutura do sistema de armazenamento em bateria é composta por banco de baterias, sistema de gerenciamento de baterias (BMS – *Battery Monitoring System*), Sistema de conversão de energia (PCS – *Power Conversion System*), controle, chaves, fusíveis, equipamentos de medição e sistemas de comunicação.

Na Figura 12 é ilustrado o diagrama esquemático da interação do ESS com a rede elétrica, assim como a direção do fluxo de energia e as formas de armazenar energia.

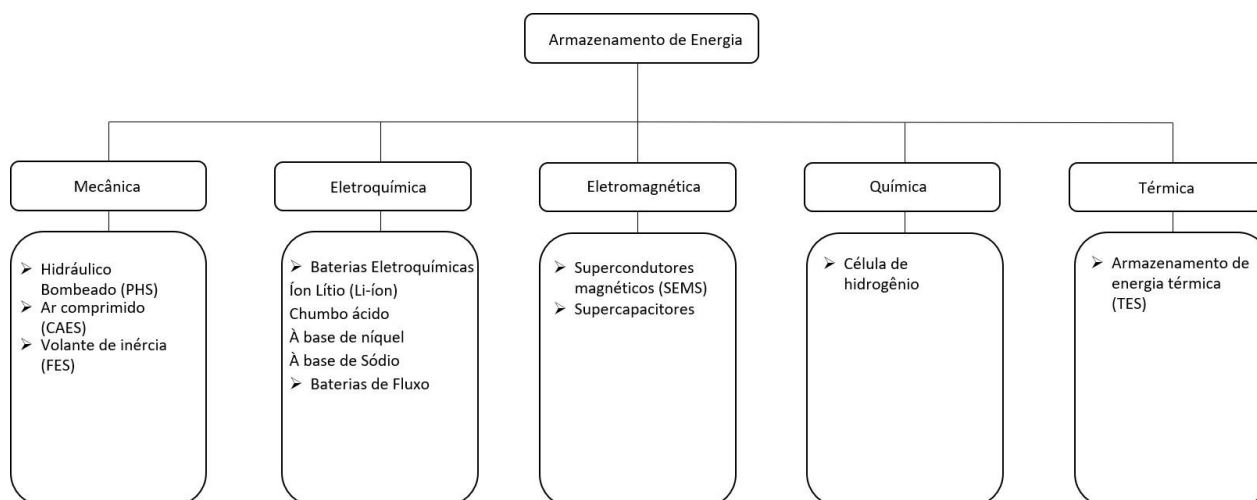
Figura 12: Sistema de Armazenamento de Energia.



Fonte: Próprio Autor.

Uma maneira de categorizar os sistemas de armazenamento baseia-se na forma de como a energia é armazenada, segundo a Figura 13.

Figura 13: Formas de armazenamento de energia.



Fonte: Adaptado de (Maria C.Argyroua, 2018).

Dentre todas as formas de armazenar energia elétrica, no presente trabalho será abordado apenas a forma química.

• **Armazenamento de Forma Eletroquímica**

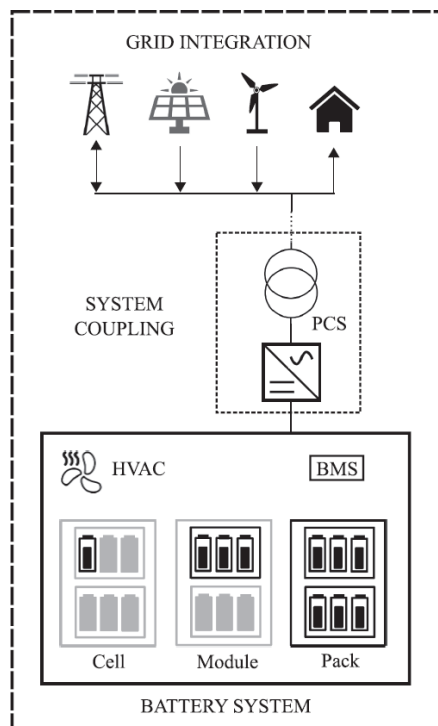
O armazenamento de forma eletroquímica é composto por duas categorias: baterias eletroquímicas e baterias de fluxo. Essa forma de armazenamento possui várias tecnologias em decorrência da diversidade de elementos químicos que são utilizados nas estruturas (ânodo, cátodo e eletrólito) responsáveis por realizar a reação química de conversão de energia.

Os bancos de baterias que compõem um sistema de armazenamento são formados por células de baterias individuais em série e/ou em paralelo. De acordo com (Bazargan, 2014), um grupo de células de baterias é conectado entre si através de contadores CC para formar bancos de baterias. A função dos contadores CC é desconectar uma bateria do restante nos casos em que haja falhas, como por exemplo, sobretensão, afundamento de tensão ou sobrecarga de corrente em uma célula de bateria, além de fusíveis e sistemas de resfriamento para proteger as baterias de sobrecarga e temperaturas excessivas.

O sistema BMS por sua vez é responsável por monitorar e controlar da bateria, garantindo a operação segura das células da bateria, como mostrado na Figura 14. Segundo (Bazargan, 2014) (Marvin Killer, 2020). Esse sistema é composto por placas eletrônicas de múltiplas entradas e saídas digitais e analógicas, unidades centrais de processamento e módulos de comunicação para fazer a ponte entre sistemas de controle

de supervisão. O sistema evita que as células individuais superaqueçam, além de calcular o estado de carga (SOC) em uma célula de bateria.

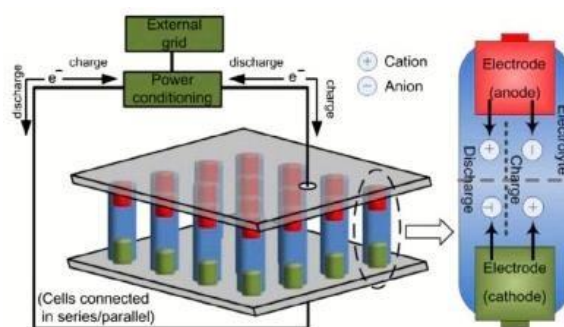
Figura 14: Layout ilustrativo do BESS.



Fonte: (Marvin Killer, 2020)

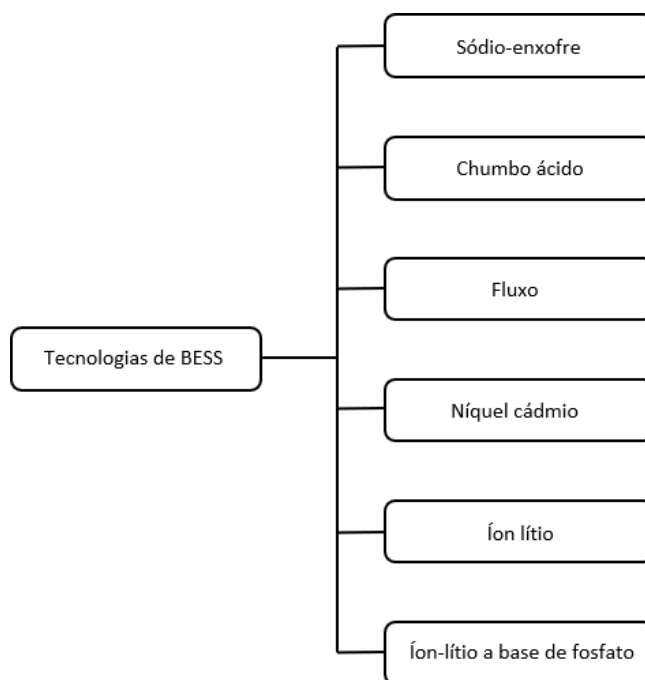
A bateria é composta por células onde há as reações eletroquímicas que permite e energia elétrica ser convertida em energia química e sentido inverso da conversão. A célula por sua vez é composta pelo cátodo, ânodo e eletrólito (Figura 15) e podem ser agrupadas em série ou em paralelo para fornecer a tensão e a capacidade desejada do BESS.

Figura 15: Representação esquemática da célula presente no BESS.



Fonte: Adaptado de (A.G.Olabi, 2020)

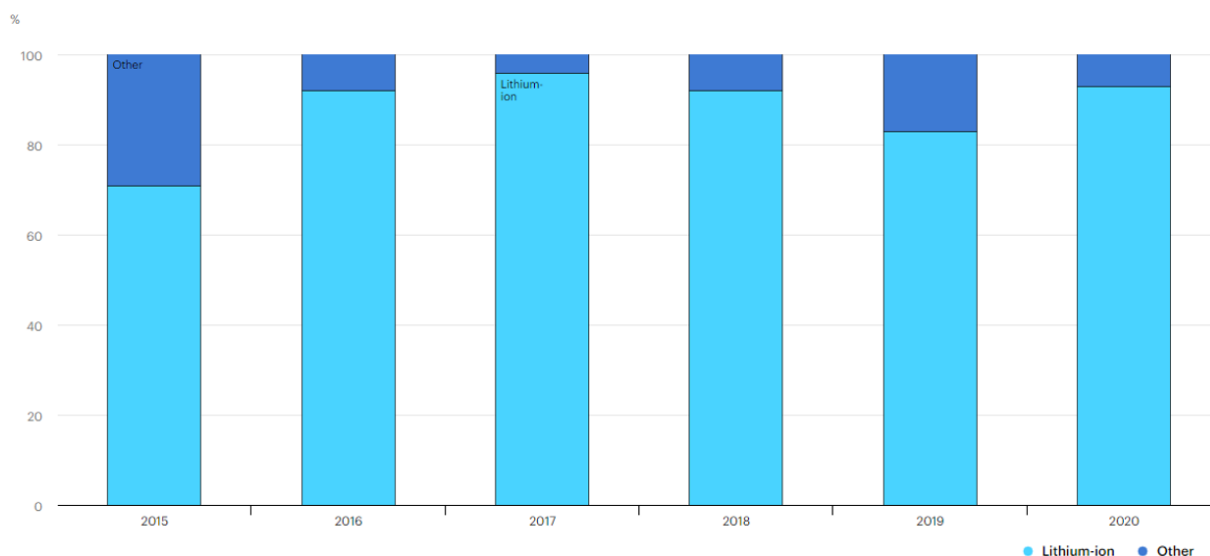
O BESS tem sido empregado em diferentes aplicações no sistema elétrico e apresenta diversas tecnologias. A Figura 16 elenca algumas das tecnologias existentes.

Figura 16: Tecnologias de BESS.

Fonte: adaptado (Mohammed Yekini Suberu, 2014)

O crescente interesse em tecnologias de armazenamento de energia no suporte à rede é uma realidade hoje. Em particular, sistemas baseados em baterias de lítio evoluíram de forma rápida e com ampla gama de aplicações e características que a diferem dos demais modelos (Hesse, Schimpe, & Jossen., 2017). A predileção do emprego do lítio deu-se em virtude de sua estabilidade a longo prazo, alta densidade de energia, custo, segurança e capacidade de carregar e descarregar sem apresentar o efeito de memória (BRUCE DUNN, 2011).

As baterias de Li-íon correspondem a maior parcela de capacidade instalada dentre outras tecnologias de armazenamento de energia, como mostrado na Figura 17. Além disso, possuem diversas aplicações em sistemas elétricos (gerenciamento do congestionamento do sistema de distribuição e transmissão, integração com fontes renováveis, *peak shaving*, microrredes etc.), sistemas de telecomunicações e em aparelhos eletrônicos portáteis. Segundo (Mohammed Yekini Suberu, 2014) (Marvin Killer, 2020) nem todas as aplicações do BESS de Li-íon podem ser implementadas na prática por conta da viabilidade econômica.

Figura 17: Capacidade instalada de armazenamento de baterias de Li-íon.

Fonte: Adaptado de (Kamiya, 2021)

As células da bateria de Li-íon apresentam o mesmo princípio presente na Figura 15, no qual o cátodo é formado por um óxido metal de lítio, o ânodo geralmente é constituído de carbono (grafite) e o eletrólito de sal de lítio dissolvido em solvente orgânico. O lítio apresenta alguns benefícios quando são comparados com outros metais usados no BESS, como por exemplo: ser um elemento atóxico, muito leve eletropositivo. (Marvin Killer, 2020). A Tabela 2 mostra os vantagens e desvantagens das células de Li-íon.

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens das células de Li-íon.

Vantagens	Desvantagens
Alta energia e potência específica	Alto custo de capital
Alta confiabilidade	Necessidade de um BMS avançado
Baixa taxa de autodescarga	Fraca recuperação e reciclagem
Velocidade de carregamento satisfatória	Incidentes com fuga térmica

Fonte: Adaptado de (Marvin Killer, 2020)

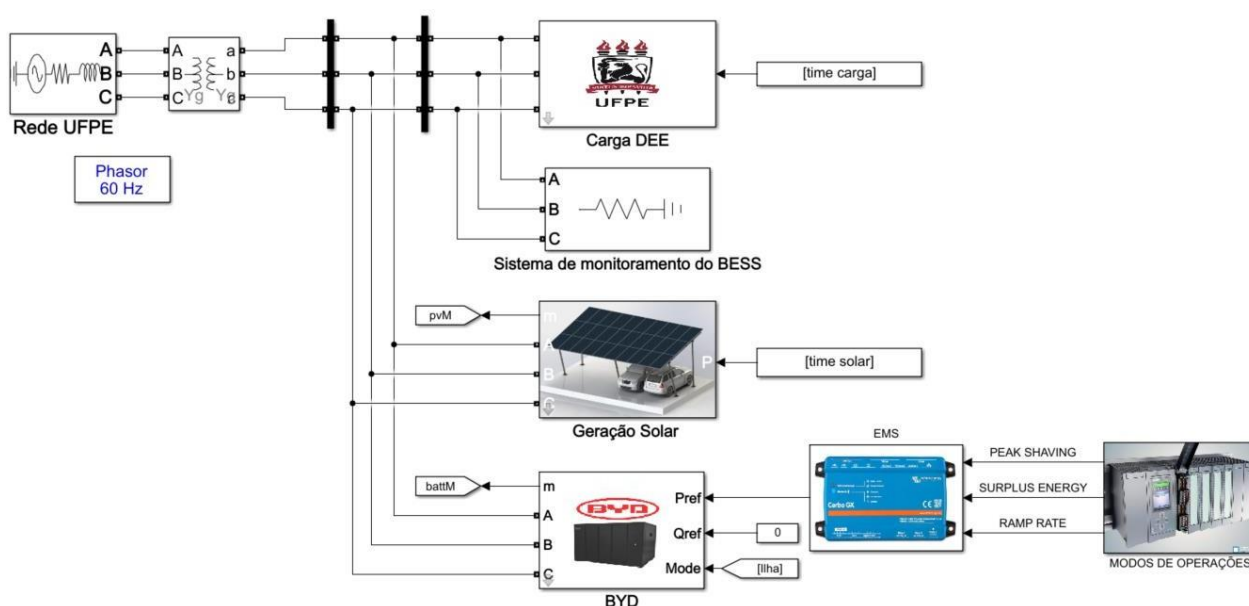
Um ponto a destacar das células de Li-íon está relacionado ao potencial baixo para os processos de reciclagem, porém em (Hill, 2021) descreveu a produção da primeira célula de bateria Li-íon totalmente reciclado, sendo um avanço para tornar ainda mais viável sua integração com o sistema elétrico.

3 METODOLOGIA

O modelo do sistema elétrico apresentado foi construído com recursos e componentes da biblioteca do Matlab/Simulink®; em especial do *Simscape*, *SimPowerSystems*, de forma a implementar e simular o sistema proposto. O modelo é constituído pelos subsistemas: rede elétrica, geração FV (caracterizando uma fonte renovável), BESS e cargas (variável e fixa).

A simulação escolhida para o cenário foi desenvolvida no modo *phasor* visto que as simulações pretendidas exigiram um espaço temporal maior. Este modo permite efetuar simulações com um espaço temporal maior em um curto espaço de tempo. Não necessita de resolver todas as equações diferenciais resultantes da interação dos componentes R, L e C. A Figura 18 apresenta o sistema elétrico elaborado para realizar os estudos presentes no trabalho.

Figura 18: Sistema elétrico representado no Matlab/Simulink®.



Fonte: Próprio Autor.

Com objetivo de validar o desempenho dos modos de operações do BESS apresentados no subtópico 2.1, é fundamental descrever a lógica de funcionamento para cada modo. Sendo assim, será detalhado a partir dos fluxogramas como os algoritmos de cada modo de operação poderão ser executados e suas respectivas estruturas no Matlab/Simulink®.

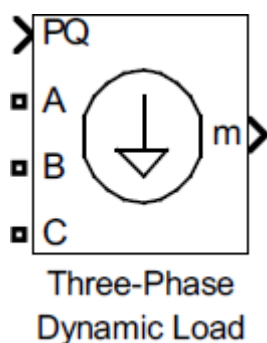
Outro ponto importante para complementar o estudo, foi a utilização da software PVSol para simular o perfil da geração FV no local da instalação do sistema.

3.1 Modelo PQ no Simulink/Matlab

O bloco *Three-Phase Dynamic Load* (Figura 19), disponível na biblioteca *SimPowerSystems* do Matlab/Simulink® foi utilizado para definir os valores de tensão sequência positiva e correntes de sequência positivas equilibradas nas fases A, B e C; a partir dos valores de entrada do bloco de potência ativa (P) e reativa (Q).

Esses valores de tensão e corrente auxiliam na integração dos subsistemas e no desenvolvimento dos modos de operação do BESS.

Figura 19: *Three-Phase Dynamic Load*.



Fonte: (MathWorks-Matlab)

O bloco da Figura 19 será empregado nos subsistemas: geração FV, BESS e carga variável presente na Figura 18.

3.2 Sistema de Geração Solar

Diante da necessidade de se obter a potência injetada na rede, foi simulada a geração a partir do software PVSOL© (Figura 20), permitindo analisar o perfil de geração solar ao longo de um determinado período (dia, mês, ano).

Figura 20: Software PVSOL.

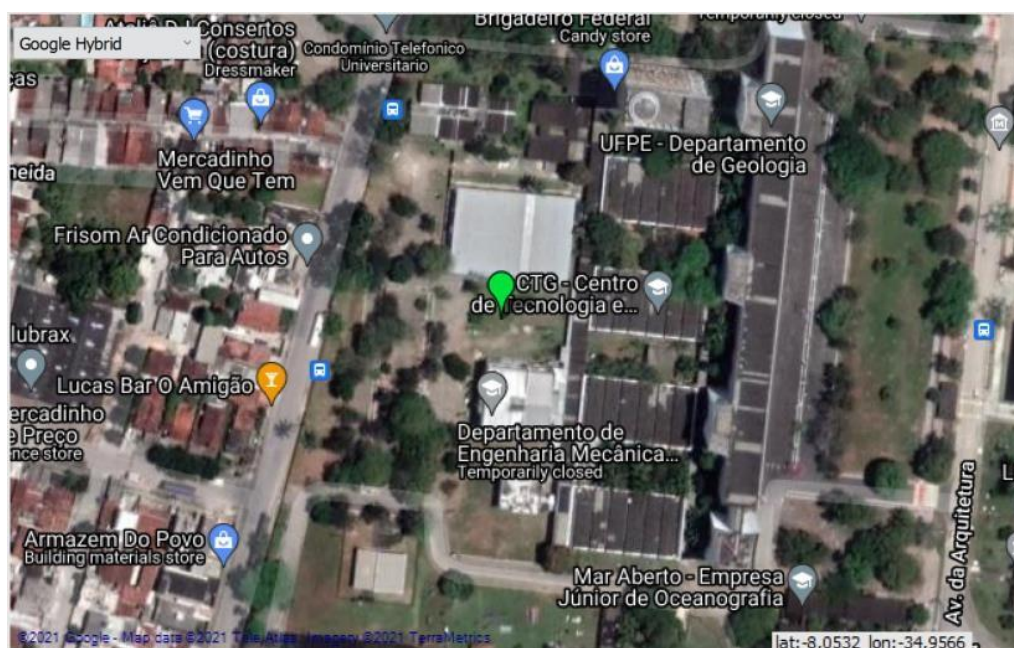


Fonte: (PV*SOL).

Para realizar a simulação, é preciso definir as características do sistema FV, como por exemplo: localização da instalação, quantidade de módulos fotovoltaicos, tipo do sistema (monofásico ou trifásico) etc.

A Figura 21 mostra uma alternativa de instalação do sistema FV, utilizando a localização do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE como referência.

Figura 21: Localização da instalação dos painéis solares.



Fonte: (PV*SOL).

Definir a localização é um ponto importante visto que fornece dados de irradiação solar e, conseqüentemente, calcula-se a geração de energia solar injetada no sistema através do software.

Após a definição da localização, o segundo passo é buscar as especificações técnicas do sistema FV que será implementado. A Tabela 3 apresenta as características técnicas do sistema que será instalado.

Tabela 3: Especificações técnicas do sistema FV.

Especificações Técnicas do Sistema FV	
Módulo Jinko Solar Tiger Pro JKM450M-60HL4-(V)	24 módulos
Potência nominal	10,8kWp
Tensão	30V
Sistema	Trifásico
Fator de potência	1
Limitação de potência	95% no inversor
Perdas nos cabos	2%

Fonte: Próprio Autor.

O software PVSOL© simula e fornece dados de potência da geração solar diária injetada no sistema. Esses dados são obtidos em formato Excel (.x/sx), com uma taxa de amostragem de 60 segundos. Os dados extraídos serão utilizados para representar a curva de geração solar no Matlab/Simulink®.

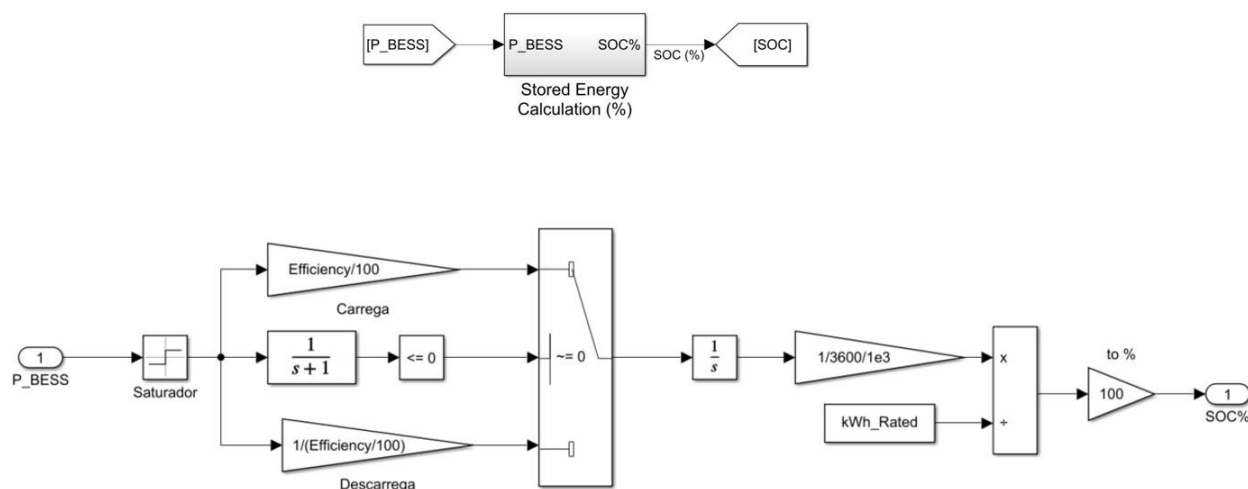
A utilização da ferramenta PVSOL© permitiu obter o perfil de geração de energia da instalação fotovoltaica o mais próximo possível da instalação real.

3.3 Modelo do BESS no Simulink/Matlab

Em razão da complexidade de simular um banco de baterias no Matlab/Simulink®, neste trabalho, foi adotado um modelo simplificado como forma de garantir os processos de recargas (ou cargas) e descargas, com objetivo de viabilizar a implementação dos modos de operações do BESS.

Para definir os ciclos de recargas e descargas do BESS é preciso analisar o SOC (%). A Figura 22 representa o sistema que calcula a partir da potência do BESS (P_{BESS}) o SOC (%). Os valores de P_{BESS} podem ser positivos (definido para fornecer energia) ou negativo (definido para armazenar energia). Dessa forma, o SOC (%) do BESS varia de acordo com os ciclos, se o BESS armazena o SOC (%) aumenta, caso contrário, o BESS descarrega e SOC (%) diminui.

Figura 22: Cálculo do SOC (%).



Fonte: adaptado de (TAVARES, 2015)

Os valores de P_{BESS} serão definidos de acordo com cada modo de operação que o BESS poderá exercer. Assim como os parâmetros relacionados ao BESS, potência nominal (kW), capacidade nominal (kWh), SOC (%) inicial, eficiência (%) e limite máximo de recarga e descargas (%).

Os parâmetros do BESS usados na simulação são referentes ao BESS que será utilizado no laboratório (Figura 23), de acordo com a Tabela 4.

Figura 23: BESS presente no laboratório.



Fonte: (BYD).

Tabela 4: Especificações técnicas do BESS.

Especificações Técnicas do BESS (BYD)	
Potência nominal	12,8 kW
Capacidade nominal	13,8 kWh (100% DOD)
Eficiência	> 95,3%

Fonte: (BYD).

3.4 Peak Shaving

A função *Peak Shaving* tem como objetivo analisar se a potência da carga (P_{Carga}) ultrapassa a potência de corte (P_{Corte}) definida para um determinado sistema. Do ponto de vista mais prático, é necessário verificar se em algum momento o perfil da curva de carga ultrapassa o valor da demanda contratada pelo consumidor. A potência de corte definida é equivalente o valor máximo de demanda contratada.

A equação 1 verifica se o valor da carga excede a potência de corte:

$$P_{Carga} > P_{Corte} \quad (1)$$

Caso a condição da equação 1 seja satisfeita, o BESS fornecerá a potência necessária para compensar a potência ultrapassada pela carga. A potência fornecida pelo BESS segue a equação 2:

$$P_{BESS} = P_{Carga} - P_{corte} \quad (2)$$

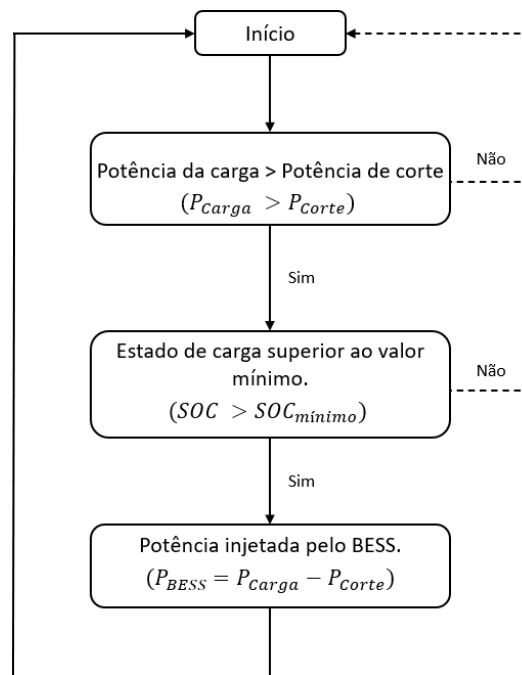
Para o BESS ser capaz de injetar a potência solicitada (EQ) é necessário analisar a restrição do SOC no momento da aplicação. Essa restrição verifica se o SOC é maior que $SOC_{mínimo}$ definido, sendo verdadeira, assegura que a potência poderá ser injetada. Caso a restrição seja violada (falsa), o BESS não será capaz de injetar potência.

Um outro ponto importante que vale ressaltar na restrição do SOC é verificar se o SOC no momento da atuação do BESS apresenta um valor próximo ou não do $SOC_{mínimo}$. Se o valor estiver próximo, o BESS irá entregar apenas uma parte da potência solicitada.

A Figura 24 ilustra um fluxograma para a implementação da função *Peak Shaving*.

Nesta função, como o BESS necessita suprir a potência solicitada pela equação 2, o modo de operação das baterias será apenas de descarga. Dessa forma, não existirá nenhuma condição que vise o carregamento do BESS.

Figura 24: Fluxograma do modo de operação *Peak Shaving*.



Fonte: Próprio Autor.

Com o fluxograma apresentado, a implementação o modo de operação *Peak-Shaving* no *Simulink/Matlab* está presente no APÊNDICE A: MODO DE OPERAÇÃO *PEAK SHAVING*.

3.5 Surplus Energy

A aplicação *Surplus Energy*, denominada energia excedente, consiste em aproveitar a energia gerada que não está sendo utilizada para atender as solicitações de carga ou o excesso de energia decorrente das limitações do despacho energético. A energia pode ser armazenada no BESS e injetada na rede posteriormente, para atender algum tipo de serviço.

Para realizar a função é necessário definir uma potência máxima do despacho ($P_{Máximo}$) da geração FV. Com isso, analisamos se a há ou não energia excedente pela equação 3:

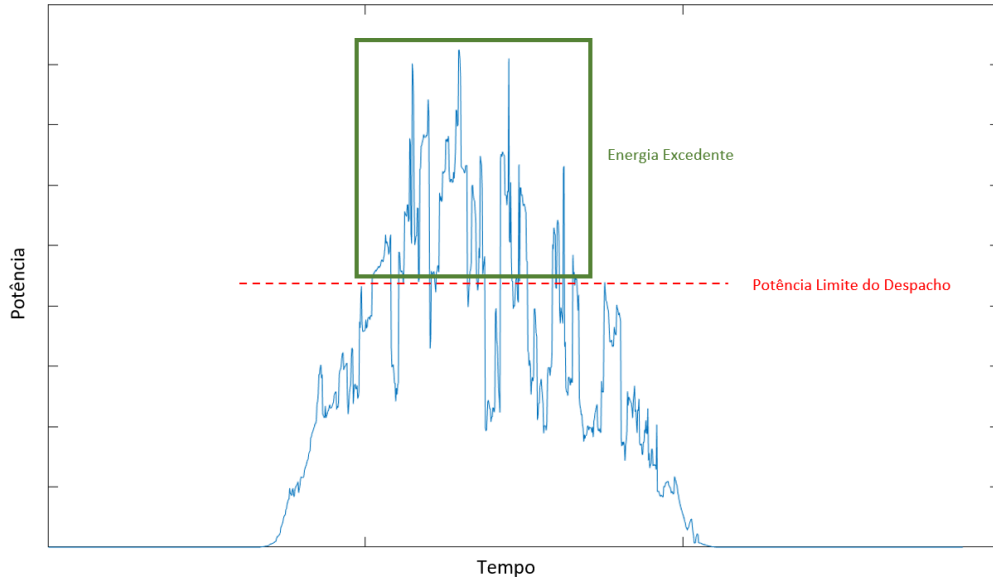
$$P_{FV} > P_{Máxima} \quad (3)$$

Se a condição da equação 3 for satisfeita, o BESS tem potencial para armazenar a energia excedente da geração FV, ou seja, a energia armazenada será igual a energia excedente, definida pela equação 4:

$$P_{Armazenada} = P_{Surplus} = P_{FV} - P_{Máxima} \quad (4)$$

A Figura 25 ilustra a energia excedente da geração FV e o limite máximo de potência que pode ser injetada na rede.

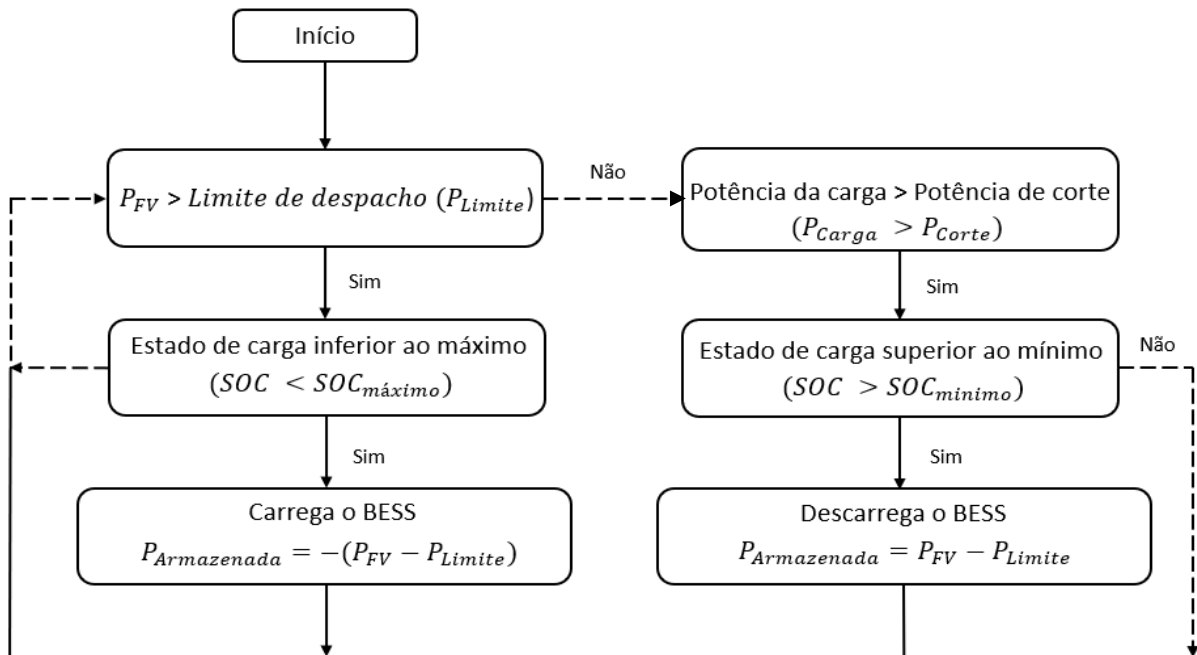
Figura 25: Ilustração da energia excedente da geração FV.



Fonte: Próprio Autor.

Nesse trabalho, a energia armazenada pelo BESS será injetada no sistema para auxiliar na potência de corte (*Peak Shaving*) da carga. A Figura 26 mostra o fluxograma.

Figura 26: Fluxograma do modo de operação *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

O fluxograma do modo de operação *Surplus Energy* no *Simulink/Matlab®* está apresentado no APÊNDICE B: MODO DE OPERAÇÃO *SURPLUS ENERGY*.

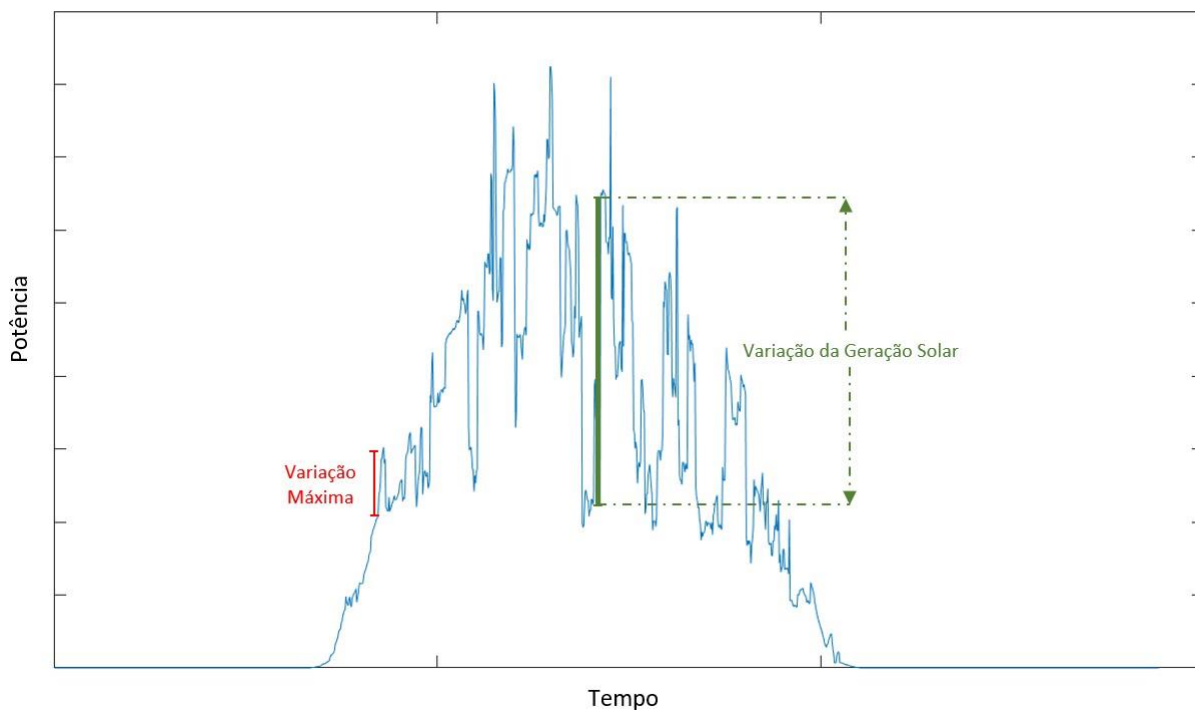
3.6 Ramp Rate Control

Ramp Rate Control, denominado controle de rampas, tem como objetivo limitar as flutuações de potência da geração FV, decorrentes da alta variabilidade de irradiação solar. Para o BESS ser capaz de suavizar essas flutuações de potência é necessário ter requisitos suficientes para absorver ou injetar energia.

A metodologia dessa função requer a definição de um valor de variação máxima que poderá haver na geração FV. Caso essa variação máxima seja ultrapassada em um determinado intervalo de tempo, o BESS entrará em operação para compensar e assegurar que esse limite não seja excedido.

A Figura 27 representa a curva característica da geração FV com a presença de flutuações de potência. Para exemplificar o conceito da função *Ramp Rate Control*, a reta vermelha significa a variação máxima definida e a verde uma variação da geração FV em um intervalo da curva.

Figura 27: Exemplo de flutuações na geração FV.



Fonte: Próprio Autor.

A estratégia de controle para modo *Ramp Rate Control* tem como base analisar a geração FV de forma que não ultrapasse a variação máxima definida. Essa análise é obtida a partir da equação 5:

$$|Psolar_{(i)} - Psolar_{(i-1)}| > Variação\ Máxima \quad (5)$$

Onde:

- $Psolar_{(i)}$ – Indica a potência solar no instante (i)
- $Psolar_{(i-1)}$ – Indica a potência solar no instante anterior $(i - 1)$

A equação 5 observa se em determinado momento a potência calculada pelo módulo da diferença entre dois pontos consecutivos ultrapassa a variação máxima estabelecida. O uso do módulo na equação 5 está relacionado com as flutuações da geração FV, que podem ser positivas ou negativas.

Portanto, para certificar que a variação máxima não seja ultrapassada é possível utilizar o BESS para injetar ou absorver potência, garantindo que isso não ocorra. A equação 6 estabelece essa condição.

$$|P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)}| + P_{BESS} \leq \text{Variação Máxima} \quad (6)$$

A partir do controle da potência do BESS P_{BESS} , positiva (descarga) ou negativa (recarga), pode-se assegurar que a condição de variação máxima não seja desrespeitada.

Sabendo da aplicação do BESS para contornar as flutuações, a potência P_{BESS} que será absorvida ou injetada é apresentada na equação 7:

$$P_{BESS} = \text{Variação Máxima} - |P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)}| \quad (7)$$

A potência absorvida(carregamento) e injetada (descarga) pelo BESS é definida nas equações 8 e 9, respectivamente.

$$P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)} > 0, \quad (\text{absorve}) \quad (8)$$

$$P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)} < 0, \quad (\text{injeta}) \quad (9)$$

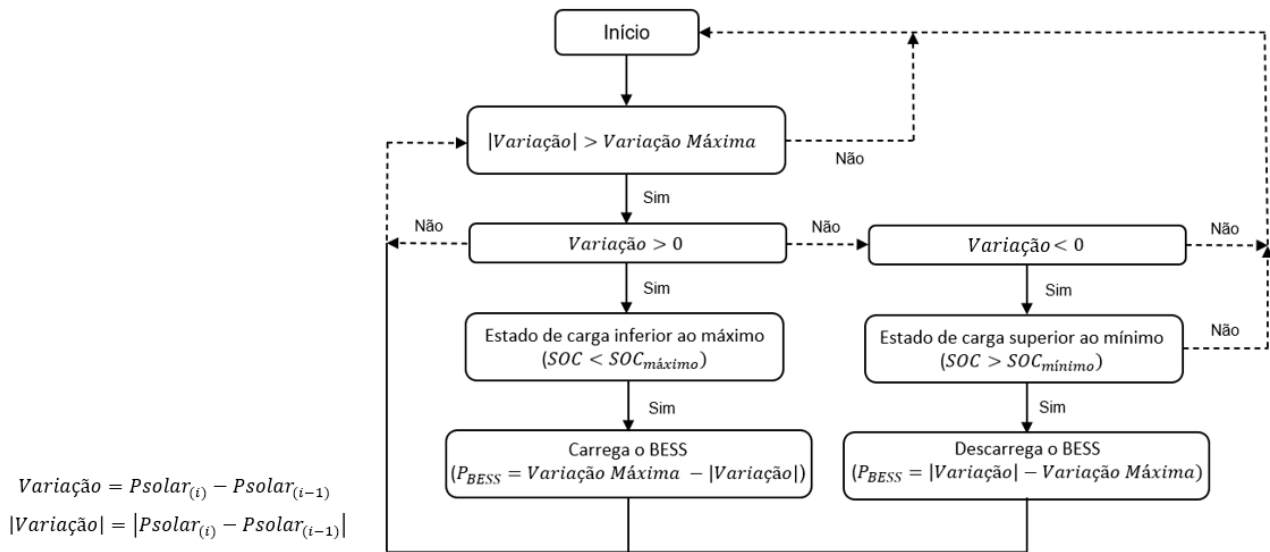
Uma variação positiva representa aumento na produção de energia, consequentemente há energia em excesso que terá que ser absorvida pelo BESS, fornecida pela equação 10. Contrariamente, se a variação for negativa significa que a geração de energia diminuiu e dessa forma o BESS precisa fornecer energia suficiente para suprir o déficit de potência, determinada pela equação 11.

$$P_{BESS} = \text{Variação Máxima} - (P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)}) \quad (10)$$

$$P_{BESS} = (P_{solar(i)} - P_{solar(i-1)}) - \text{Variação Máxima} \quad (11)$$

Definida as restrições para o *Ramp Rate Control*, a Figura 28 ilustra o fluxograma da função.

Figura 28: Fluxograma do modo de operação *Ramp Rate Control*.



Fonte: Próprio Autor.

A implementação do modo de operação *Ramp Rate Control* no Simulink/Matlab está explícita no APÊNDICE C: MODO DE OPERAÇÃO *RAMP RATE CONTROL*

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

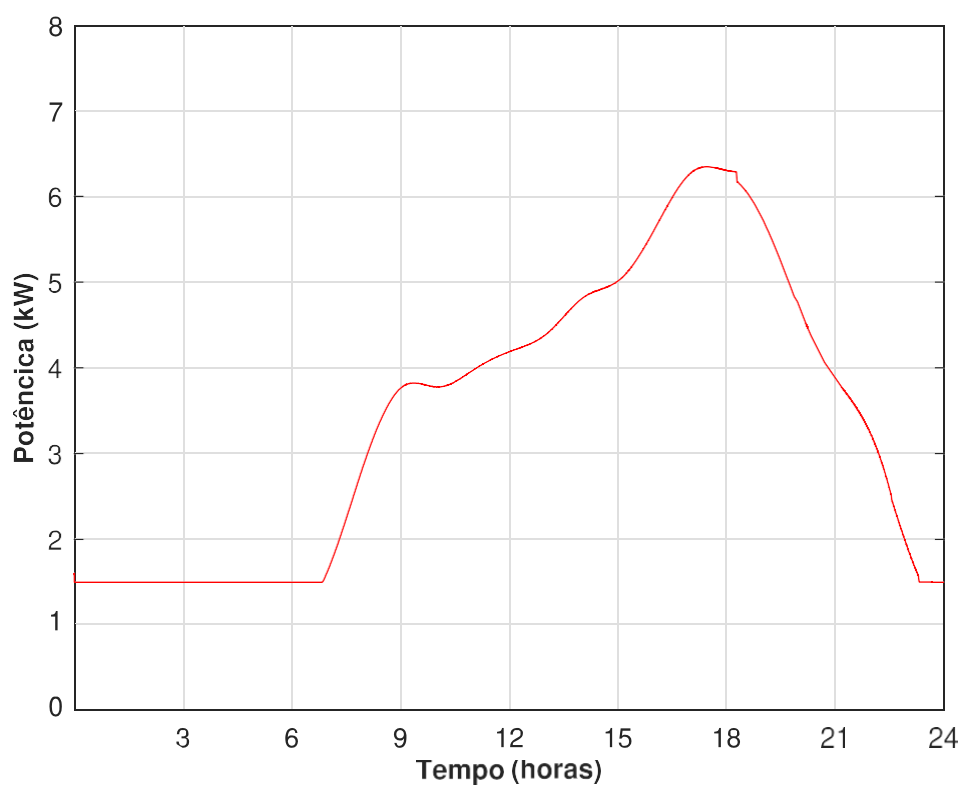
Neste capítulo, são analisados dois cenários para cada modo de operação do BESS proposto no capítulo 3. Os resultados apresentados permitem validar o funcionamento dos modos de operações e analisar o comportamento do SOC (%).

Os cenários e resultados serão avaliados separadamente para cada modo de operação, como descrito em sequência.

4.1 Cenários para modo de operação *Peak Shaving*

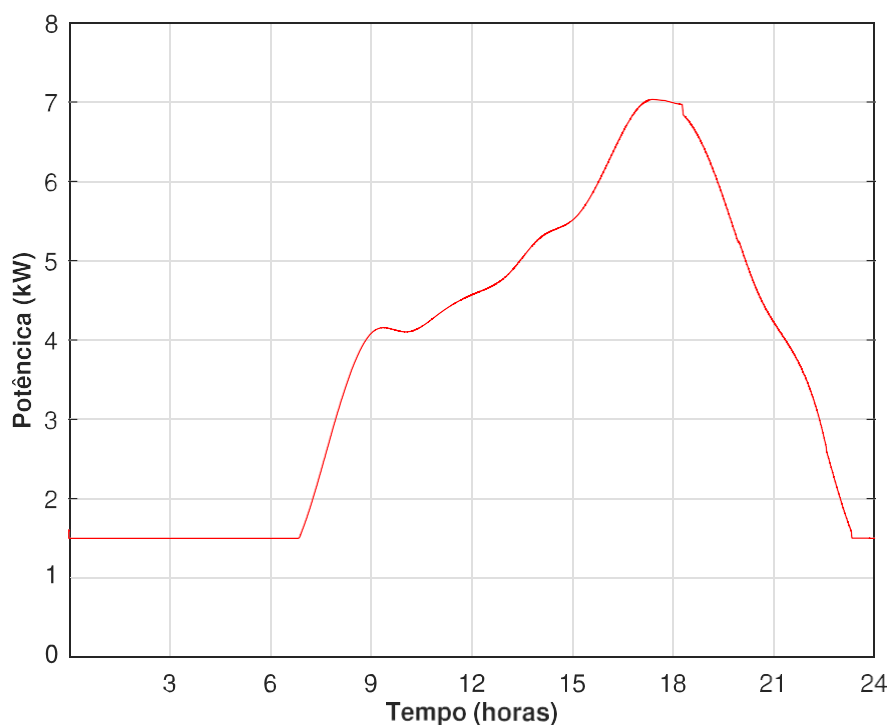
Para o modo de operação *Peak Shaving* foi proposto dois perfis de carga para analisar o desempenho do BESS. As Figura 29 e Figura 30 mostram, respectivamente, os cenários A e B implementados.

Figura 29: Carga para Cenário A.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30: Carga para cenário B.



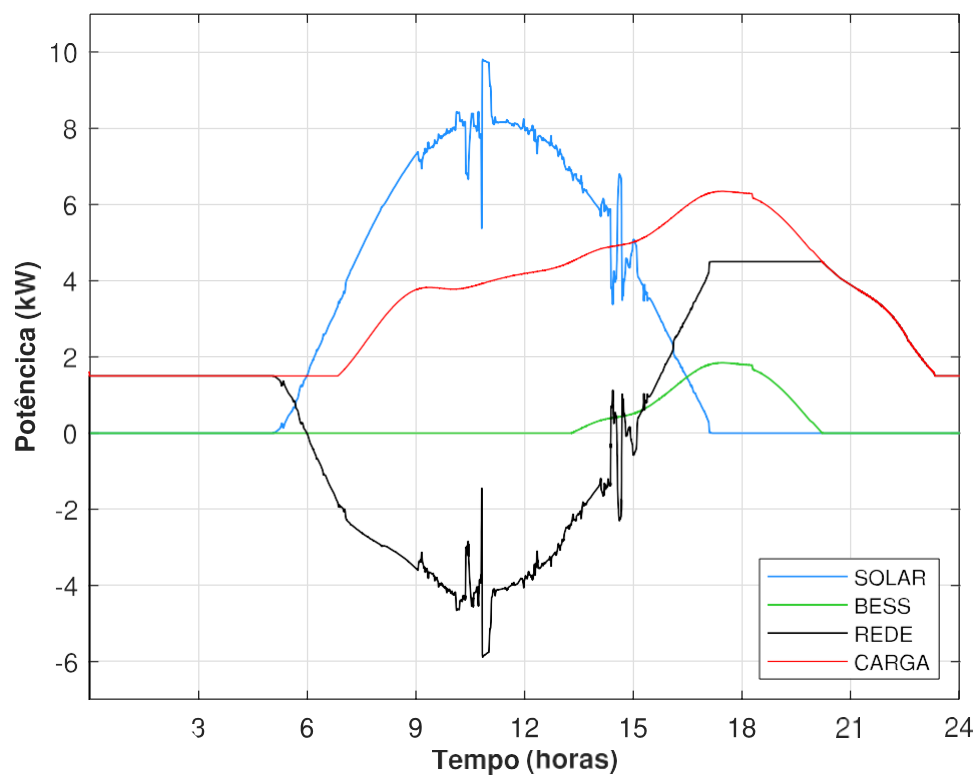
Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 apresenta um cenário em que a demanda de pico de 6,3kW, enquanto a Figura 30 a demanda de pico é de 7,0kW. Ou seja, em um cenário o BESS precisa fornecer energia para uma demanda pico maior, quando comparado ao outro.

O resultado para o cenário A é apresentado na Figura 31. No cenário A, pode observar que o BESS foi capaz de suprir toda a demanda de pico. Analisando o SOC (%) na Figura 32, partiu inicialmente de 80% (estado de armazenamento máximo) até atingir 28%. O modo de operação *Peak Shaving* conseguiu atender toda a solicitação para eliminar a demanda de máxima, a curva de cor verde presente Figura 31 mostra a potência de que o BESS injeta, sendo igual a demanda de pico solicitada para o cenário A.

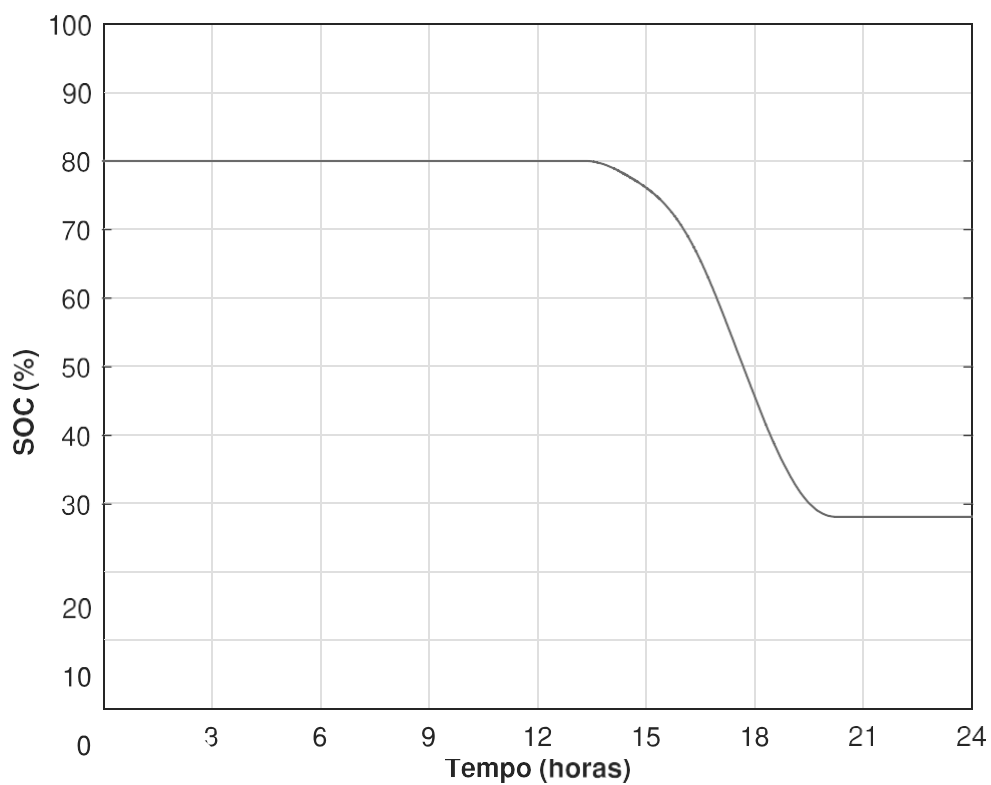
As curvas de cores azul e preta, presente na Figura 31, mostram o comportamento da geração solar e rede elétrica, respectivamente. As curvas apresentam um fluxo de potência com sinal contrário até de o instante $t = 15$ horas, ilustrando que a geração solar está injetando potência e a rede elétrica está absorvendo potência.

Figura 31: Cenário A para modo de operação *Peak Shaving*.



Fonte: Próprio autor.

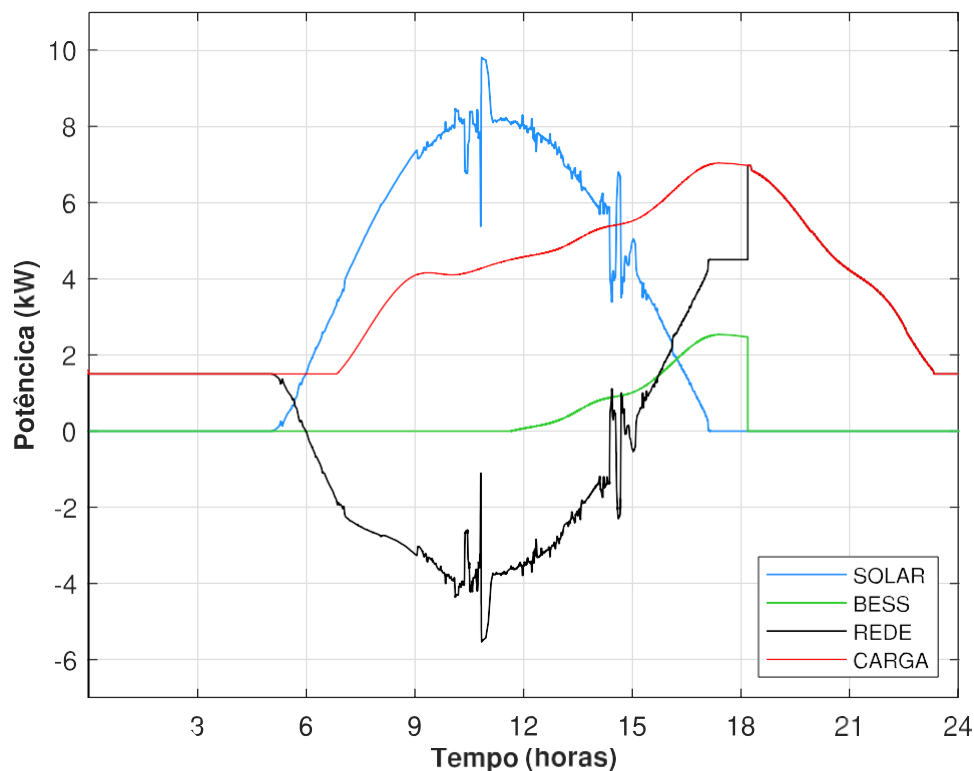
Figura 32: SOC para cenário A do modo *Peak Shaving*.



Fonte: Próprio Autor.

No cenário A, o valor do SOC após executar o modo de operação terminou acima do valor de $SOC_{mínimo}$ (20%), demonstrando que o BESS ainda tem potencial de fornecer energia.

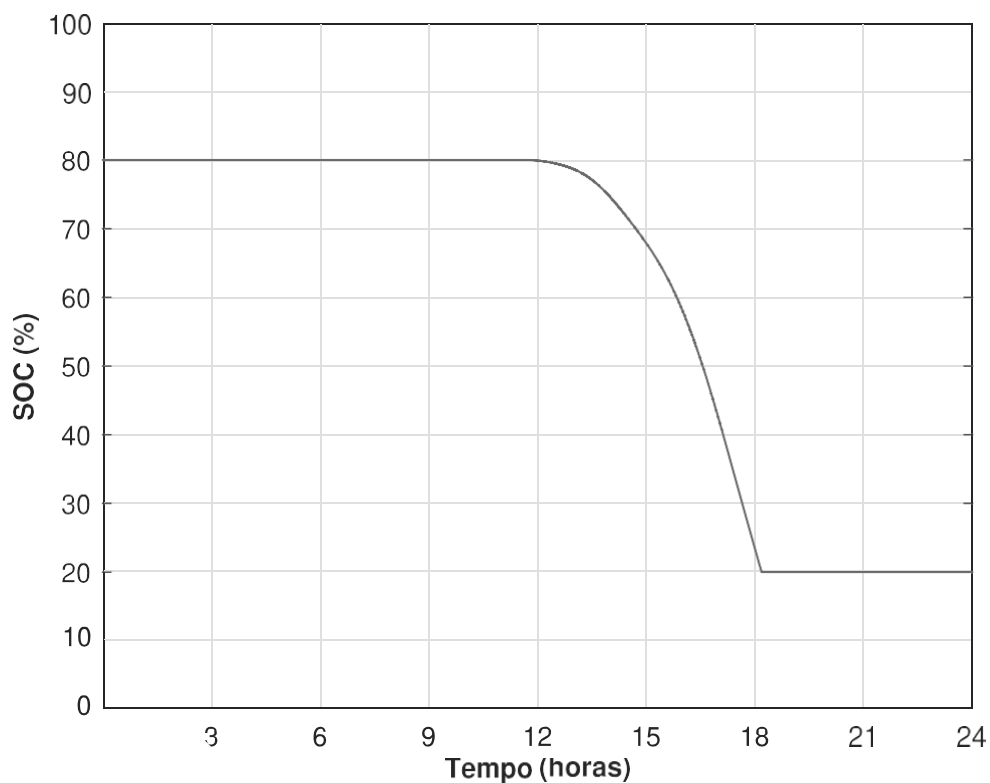
Figura 33: Cenário B para modo de operação *Peak Shaving*.



Fonte: Próprio Autor.

Já no cenário B, indicado na Figura 33 o BESS não teve capacidade de suprir toda a demanda de pico solicitada (apresentado pela curva verde), de modo que no instante aproximado de $t = 18$ horas a rede elétrica teve injetar potência para suprir a demanda solicitada. O SOC (%), na Figura 34, apresentou uma variação de 80% para 20 %, expressando que o BESS foi descarregado até atingir o $SOC_{mínimo}$, não sendo capaz de suprir a solicitação de carga desejada. Uma solução viável para contornar essa situação seria aumentar a capacidade do BESS na simulação.

Figura 34: SOC para cenário B do modo *Peak Shaving*.



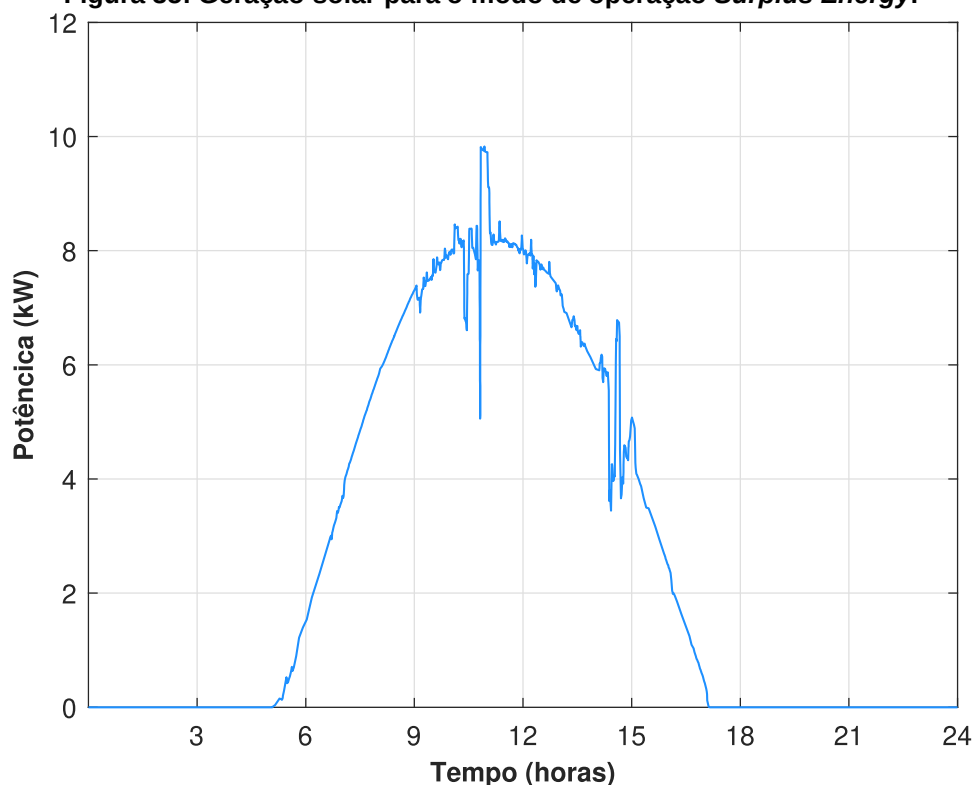
Fonte: Próprio Autor.

4.2 Cenários para modo de operação *Surplus Energy*

O modo de operação *Surplus Energy* utiliza a energia excedente da geração FV para atender determinada solicitação de carga. O perfil de carga adotado para esse modo de operação será igual ao mostrado na Figura 29 presente no subtópico 4.1

A curva de geração solar empregada para o modo de operação é apresentada na Figura 35, obtida a partir da simulação utilizando o software PVSOL, caracterizando a geração do laboratório.

Figura 35: Geração solar para o modo de operação *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

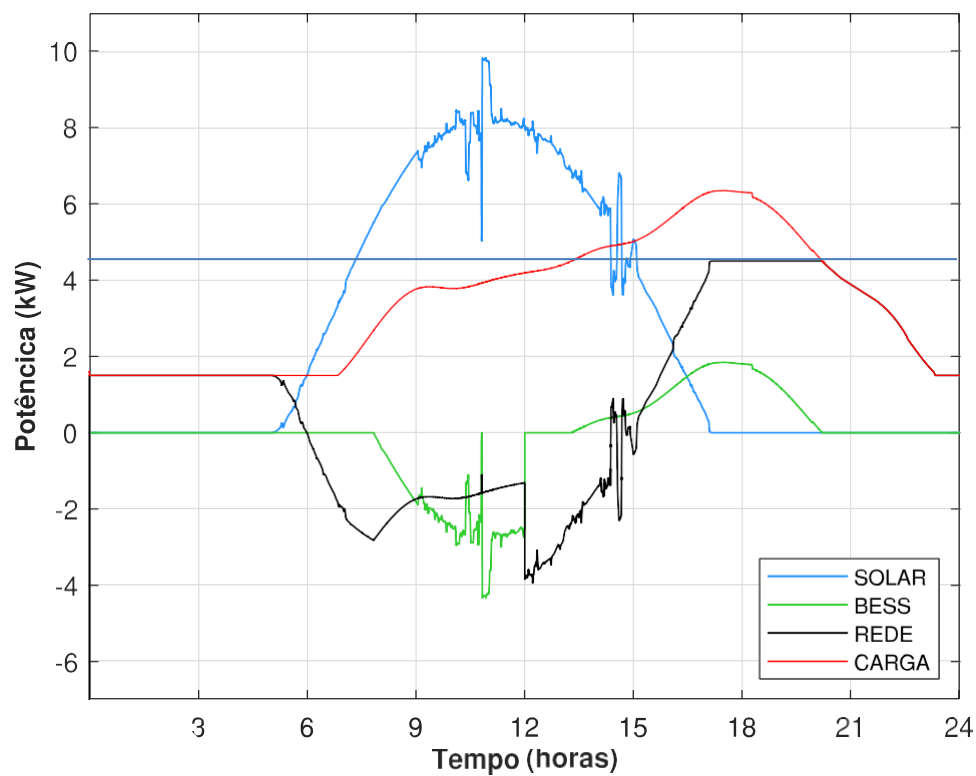
Como descrito no subtópico 3.5, foi necessário definir uma potência para limitar o despacho de energia FV. A energia que ultrapassou o limite máximo auxiliou no carregamento do BESS. Com isso, foi proposto dois cenários para o limite máximo:

- Cenário A: limite máximo de 5,5kW para geração solar e atender a carga quando a potência ultrapassar 4,5kW
- Cenário B: limite máximo de 6,5kW para geração solar e atender a carga quando a potência ultrapassar 4,5kW;

Para simulação do modo de operação *Surplus Energy*, determinou-se o $SOC_{inicial}$ do BESS de 20%, retratando uma condição de que o BESS estava inicialmente com baixa capacidade; armazenou a energia excedente da instalação solar e em seguida forneceu energia para a solicitação de carga.

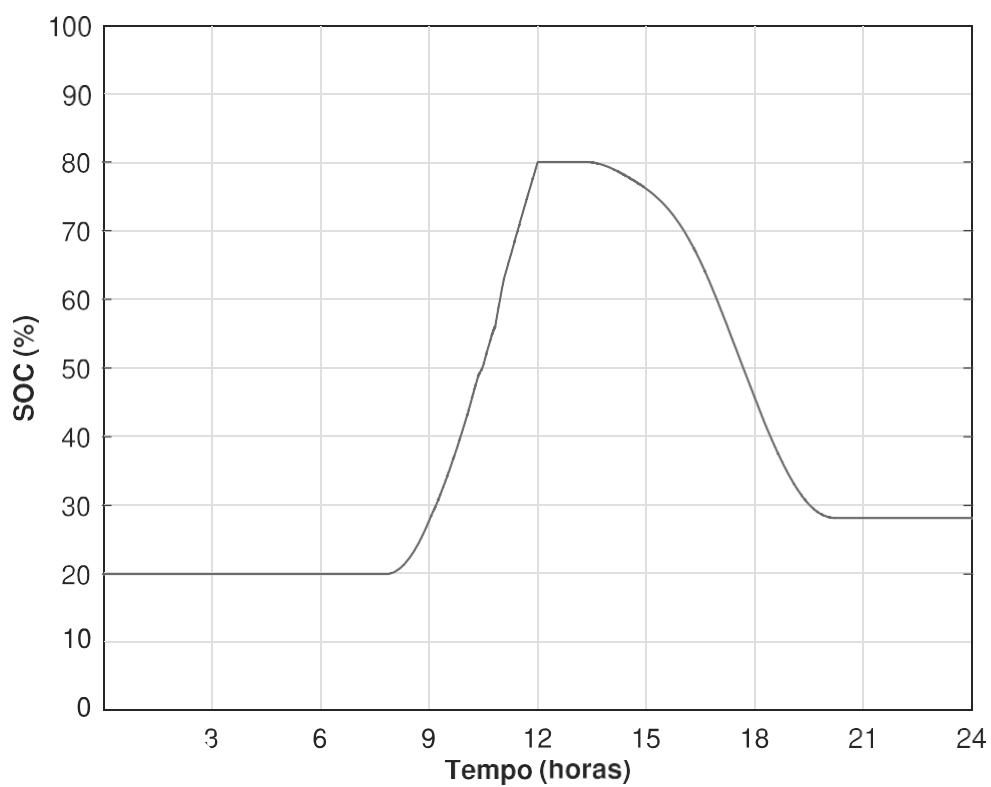
As Figura 36 e Figura 37 mostram, respectivamente, a curva de potência e o SOC do BESS durante o modo de operação para o cenário A.

Figura 36: Cenário A para modo de operação *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 37: SOC para cenário A do modo *Surplus Energy*.

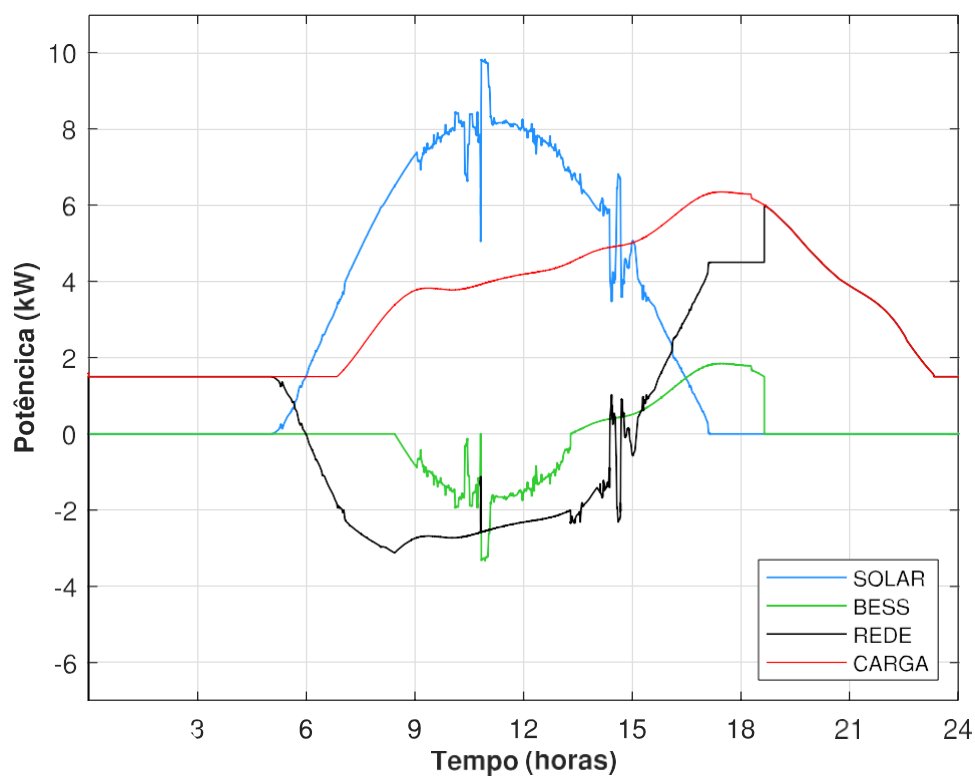


Fonte: Próprio Autor.

No cenário A, o BESS desempenhou seu papel de forma satisfatória. A curva de cor verde na Figura 36 mostra o BESS armazenando energia ($t = 8$ horas) quando há excesso de geração solar e posteriormente injetando energia ($t = 13$ horas) para atender a carga. Isso também pode ser visto a partir da curva do SOC presente na Figura 37, onde o SOC sai de 20% para 80% (armazenando) e em outro instante sai de 80% para 28% (fornecendo).

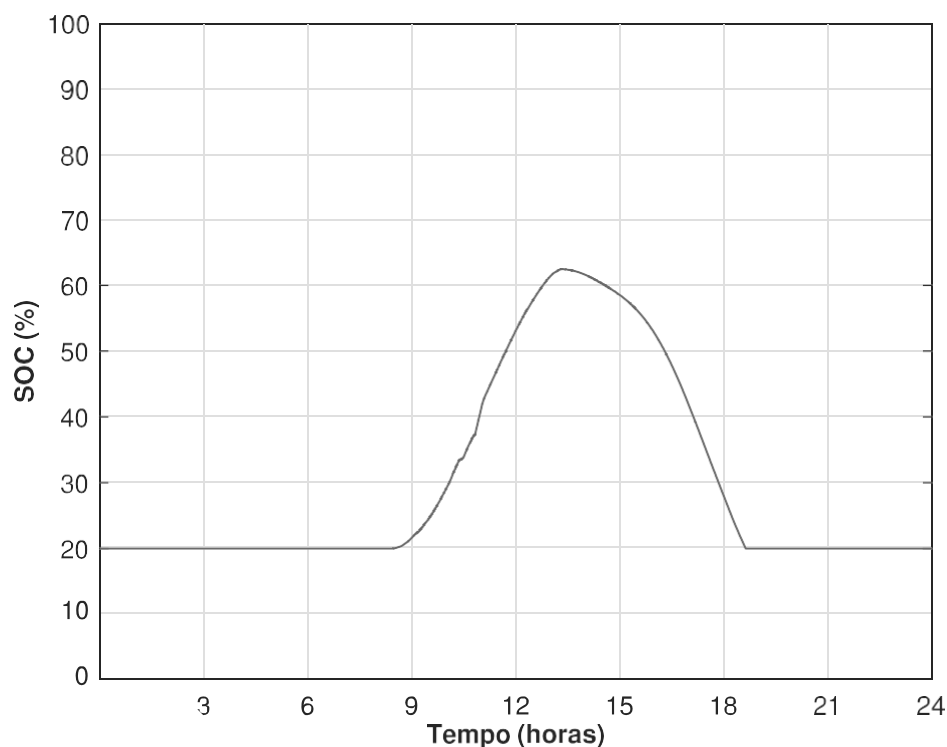
Já as Figura 38 e Figura 39 apresentam os resultados do modo de operação para o cenário B. A Figura 38 indica a energia armazenada e fornecida pelo BESS, enquanto a Figura 39 representa o comportamento do SOC.

Figura 38: Cenário B para modo de operação *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 39: SOC para cenário B do modo *Surplus Energy*.



Fonte: Próprio Autor.

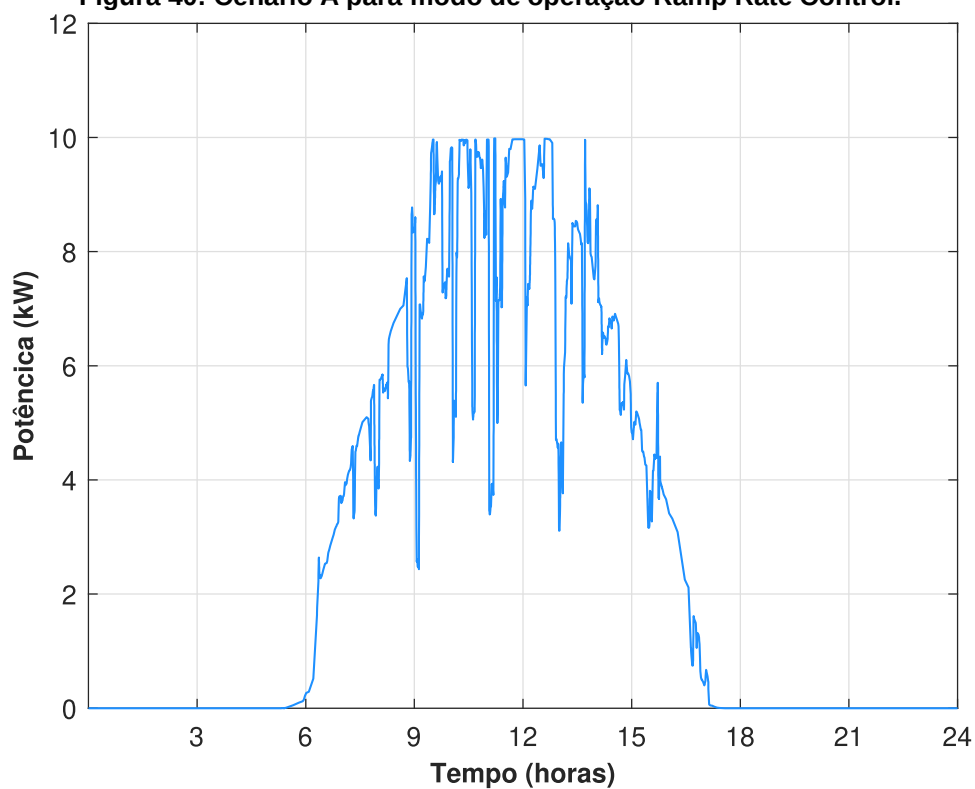
No cenário B, o BESS armazenou energia excedente ($t = 8,5$ horas) do sistema solar (SOC saiu de 20% para 62%), mas a energia não foi suficiente para recarregar o BESS até 80% do SOC. Além disso, a energia armazenada pelo BESS não teve potencial para suprir a solicitação de carga. O comportamento pode ser observado na Figura 39.

Analisando as Figura 36 e Figura 38, é possível observar que o BESS no cenário A teve capacidade de armazenar uma parcela da energia excedente total, enquanto no cenário B o BESS armazenou toda a energia excedente. Para contornar essa situação, necessita prever um limite de despacho que seja adequado com a capacidade do BESS empregado no modo de operação.

4.3 Cenários para modo de operação *Ramp Rate Control*

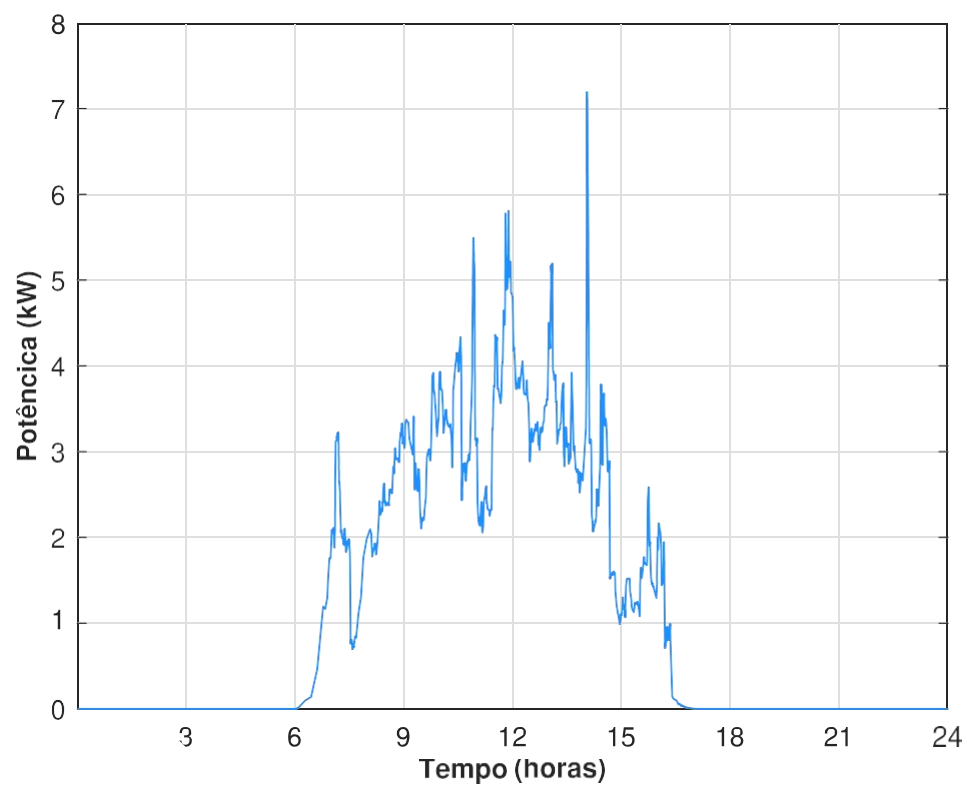
No modo de operação *Ramp Rate Control* foi proposto dois perfis de geração solar que representam a energia produzida pela instalação fotovoltaica. O cenário A, como mostrado na Figura 40, caracteriza a geração solar em um dia considerado de boa geração, ou seja, a irradiação solar alta durante período observado. Já o cenário B, apresentado na Figura 41, possui uma curva de produção de energia solar com valores abaixo em relação a capacidade de geração do sistema, retratando um dia nublado.

Figura 40: Cenário A para modo de operação Ramp Rate Control.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 41: Cenário B para modo de operação Ramp Rate Control.



Fonte: Próprio Autor.

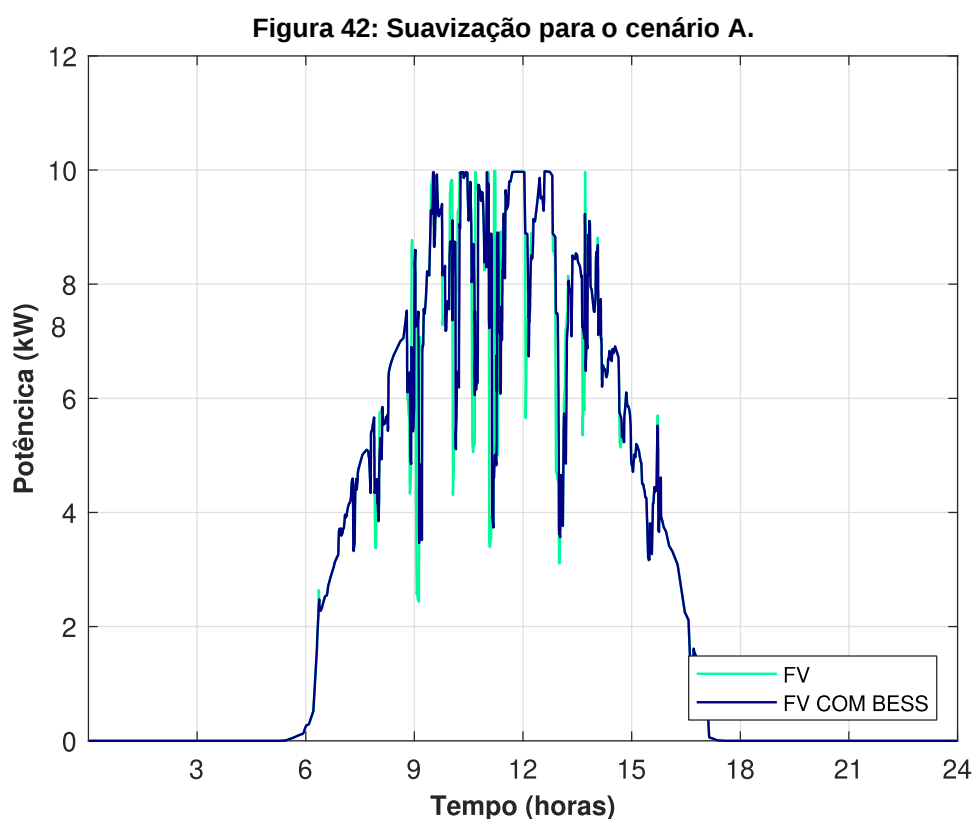
De acordo com a localização da instalação fotovoltaica do laboratório, o cenário A representa a geração do dia 06 de janeiro de 2021 (geração de 66,65kWh), onde a produção de energia solar é considerada boa. Enquanto o cenário B, corresponde a geração do dia 31 de maio de 2021 (geração de 26,17kWh), visto como um período chuvoso para esse local, conseqüentemente, possuiu uma geração ruim.

Este modo de operação tem como finalidade suavizar a potência gerada pelo sistema fotovoltaico em ambos os cenários. Como descrito no subtópico 3.6, o BESS desempenhará a suavização de potência. Dessa forma, é preciso definir a variação de potência máxima para suavizar a potência injetada pela geração FV.

O limite de variação máxima definido é de 10% da potência nominal do sistema, ou seja, 1,08kW (Tabela do sistema solar). A escolha desse limite está de acordo com (João Martins, 2019).

Definida as características do modo de operação, foram avaliados os resultados da potência suavizada e comportamento do SOC do BESS.

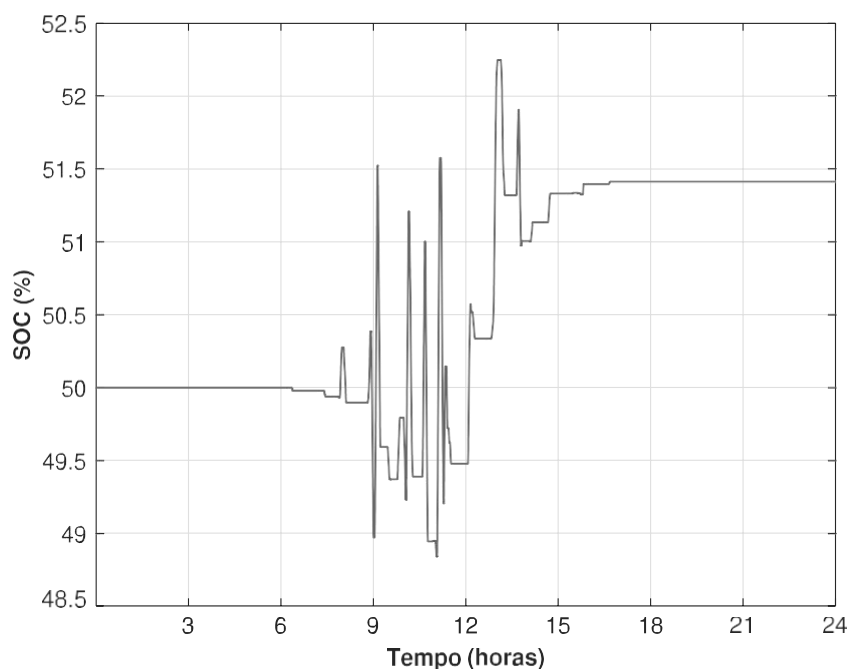
A Figura 42 mostra o resultado obtido da potência suavizada para curva de geração do cenário A.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a Figura 42, a curva de verde mostra a potência injetada pelo sistema solar sem suavização, enquanto a curva de cor azul mostra a potência suavizada. Já Figura 43 apresenta o comportamento do SOC durante a suavização.

Figura 43: SOC para suavização do cenário A.

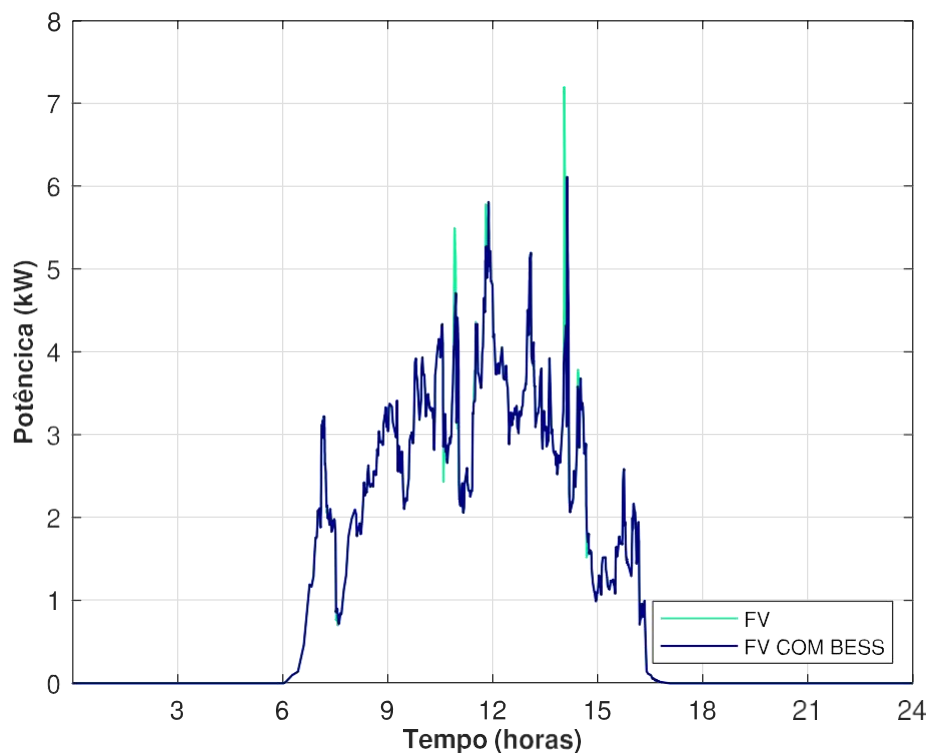


Fonte: Próprio Autor.

É possível observar Figura 43 que para condição de SOC inicial de 50%, o BESS teve potencial para absorver e injetar energia suficiente para realizar a suavização de potência. Além disso, o SOC_{final} alcançou um resultado maior do que o $SOC_{inicial}$, aproximadamente 51,5%. Isso demonstra a possibilidade de utilizar o BESS para executar o mesmo modo de operação no dia seguinte, em consequência do aumento da capacidade de energia armazenada.

A Figura 44 expressa o resultado da potência suavizada para curva de geração do cenário B.

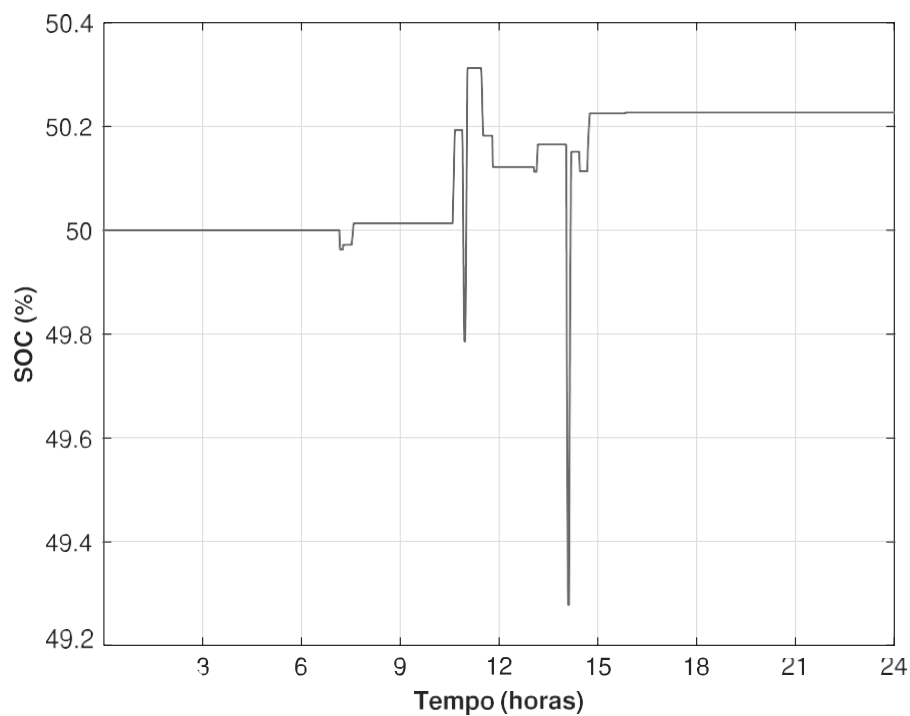
Figura 44: Suavização para o cenário B.



Fonte: Próprio Autor.

No cenário B também foi possível realizar a suavização de potência, como mostrado na Figura 44, a curva verde representa potência sem ser suavizada, enquanto a curva azul representa a potência suavizada.

Já a Figura 45 exibe o comportamento do SOC durante a suavização. Na condição de $SOC_{inicial}$ de 50%, o SOC_{final} foi ligeiramente maior (50,26%). Sendo assim, da mesma forma que aconteceu no cenário A, é possível utilizar o BESS para operar no dia seguinte.

Figura 45: SOC para suavização do cenário B

Fonte: Próprio Autor.

Uma comparativo entre os cenários A e B pode ser observado pela curva de SOC. Conforme a Figura 43, o BESS no cenário A apresentou mais ciclos de descargas e recargas do que no cenário B, presente da Figura 45. Isso mostra que o comportamento do BESS depende da curva de geração FV a ser suavizada.

5 CONCLUSÃO

Como apresentado no trabalho, conclui-se que uma forma de mitigar os impactos ocasionados pelo aumento da inserção de RESs é utilizar sistemas de armazenamento, especialmente o BEES. A utilização do BESS não se aplica apenas para contornar os impactos da integração de renováveis, mas também para auxiliar na operação da rede elétrica, como no gerenciamento de energia.

Em consequência das várias aplicações que o BESS pode exercer, no trabalho foram propostos três modo de operações (*Peak Shaving*, *Surplus Energy* e *Ramp Rate Control*) e de acordo com as simulações realizadas, concluímos que o BESS teve potencial para atender as solicitações desejadas em alguns cenários definidos.

Para o modo de operação *Peak Shaving* concluiu que a capacidade de energia do BESS define o quanto é possível suprir a demanda de pico para determinado perfil de carga. Quando o BESS não consegue suprir, é sinal de que sua capacidade deve ser aumentada.

No modo de operação *Surplus Energy* observou que o BEES pode ser empregado para armazenar a energia excedente da geração solar e posteriormente fornecer a uma determinada solicitação de carga. Diante dos resultados apresentados para esse modo de operação, concluímos que é necessário dimensionar a energia armazenada pelo BESS de acordo com energia excedente da geração solar.

Por fim, o BESS no modo de operação *Ramp Rate Control* foi capaz de amenizar as flutuações de potência da geração solar do laboratório, possibilitando ao operador do sistema controle sobre as variações de potência. A partir desse controle, viabilizar o aumento da penetração de RESs na rede elétrica.

5.1 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram avaliados alguns pontos complementares, além de servir como base para elaboração de trabalhos futuros.

- Utilizar o bloco do modelo de bateria presente no *Similink*/Matlab como forma de analisar o comportamento do BESS (análise: tensão, corrente, tempo de descarga/carga).
- Implementar o modo de operação *Peak Shaving* com base nas tarifas do sistema elétrico, permitindo uma análise de viabilidade econômica do BESS.
- Implementar uma função que seja capaz de calcular a vida útil do BESS com base no SOC.

- Otimizar os ciclos de cargas e descargas do BESS com base nas previsões de carga e de geração solar, permitindo a utilização de inteligência artificial.
- Implementar no laboratório os modos de operações presentes no trabalho como forma de comparar e validar o modelo.

REFERÊNCIAS

- A.G.Olabi, C. T.–A. (October de 2020). Critical review of energy storage systems. . *ELSEVIER - ScienceDirect - Energy*.
- ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. (s.d.). Boletim Anual - Dados 2020. Fonte: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o_2020.pdf
- ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. (01 de Novembro de 2021). Infográfiico ABSOLAR. Fonte: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>
- Bazargan, D. (2014). A study of battery energy storage dynamics in power systems. Fonte: <https://mspace.lib.umanitoba.ca/handle/1993/32463>
- BRUCE DUNN, H. K.-M. (18 de November de 2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, pp. 928-935.
- BYD. (s.d.). B-BOX PRO 13,8 - Para armazenamento de energia solar. Fonte: <https://www.byd.com.br/produtos/armazenamento-energia/>
- EPE - PDE 2030. (s.d.). Plano Decenal de Expansão de Energia - 2030. Acesso em 21 de 11 de 2021, disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-564/Minuta_do_Plano_Decenal_de_Expansao_de_Energia_2030__PDE_2030.pdf
- EPE - PEN2050. (s.d.). Plano Nacional de Energia 2050. Acesso em 21 de 11 de 2021, disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/PNE%202050%20-%20Anexo.pdf>
- Erickson, R. L. (27 de October de 2009). Integration of battery-based energy storage element in the CERTS Microgrid. Fonte: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.165.6942&rep=rep1&type=pdf>

Falko Ueckerdt, R. B. (2 de March de 2015). Analyzing major challenges of wind and solar variability in power. ELSEVIER, pp. 1-10. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115001846>

Hesse, H. C., Schimpe, M., & Jossen., D. K. (11 de December de 2017). Lithium-Ion Battery Storage for the Grid - A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. energies. Fonte: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2107>

Hill, J. S. (17 de November de 2021). Renew Economy - Northvolt produces first fully recycled lithium-ion battery cell. Fonte: Renew Economy: <https://reneweconomy.com.au/northvolt-produces-first-fully-recycled-lithium-ion-battery-cell/>

IRENA - International Renewable Energy Agency. (2019). UTILITY-SCALE BATTERIES (INNOVATION LANDSCAPE BRIEF). Fonte: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf

IRENA - International Renewable Energy Agency. (02 de June de 2020). Renewables Increasingly Beat Even Cheapest Coal Competitors on Cost. Acesso em 21 de 11 de 2021, disponível em <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2020/Jun/Renewables-Increasingly-Beat-Even-Cheapest-Coal-Competitors-on-Cost>.

ISA CTEEP. (16 de Novembro de 2021). ISA CTEEP DESENVOLVE PRIMEIRO PROJETO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS EM LARGA ESCALA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO. São Paulo. Fonte: <http://www.isactEEP.com.br/pt/noticias/isa-ctEEP-desenvolve-primeiro-projeto-de-armazenamento-de-energia-em-baterias-em-larga-escala-no-sistema-de-transmissao-brasileiro>

João Martins, S. S.-I. (8 de April de 2019). Comparative Study of Ramp-Rate Control Algorithms for PV with Energy Storage Systems. energies.

Joseph Oyekale, M. P. (9 de September de 2020). Impacts of Renewable Energy Resources on Effectiveness of Grid-Integrated Systems: Succinct Review of Current Challenges and Potential Solution Strategies. energies. Fonte:

https://www.researchgate.net/publication/344433701_Impacts_of_Renewable_Energy_Resources_on_Effectiveness_of_Grid-Integrated_Systems_Succinct_Review_of_Current_Challenges_and_Potential_Solution_Strategies

Kamiya, I. -G. (November de 2021). Energy Storage. Fonte: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>

Kein Huat Chua, Y. S. (4 de April de 2016). Energy storage system for peak shaving. Emerald Insight.

M.S. Ismail, M. T. (10 de November de 2014). Effective utilization of excess energy in standalone hybrid renewable energy systems for improving comfort ability and reducing cost of energy: A review and analysis. ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews., pp. 726-734.

Maria C.Argyroua, P. C. (October de 2018). Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. ELSEVIER - ScienceDirect , pp. 804-821.

Marvin Killer, M. F. (15 de February de 2020). Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region. ELSEVIER - Applied Energy.

MathWorks-Matlab. (s.d.). Three-Phase Dynamic Load. Fonte: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasedynamicload.html#:~:text=The%20Three-Phase%20Dynamic%20Load%20block%20implements%20a%20three-phase%2C,therefore%20balanced%2C%20even%20under%20unbalanced%20load%20voltage%20conditions>.

Mohammed Yekini Suberu, M. W. (July de 2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. ELSEVIER , pp. 499-514.

Oudalov, A., Cherkaoui, R., & Beguin., A. (06 de June de 2008). Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application. IEEE Xplore.

P. Medina, A. W. (2014). Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-Economic Benefits and Applications Analysis. Hawaii International Conference on System Science, (p. 10).

PV*SOL. (s.d.). Take your solar installations to the next level of efficiency. Fonte: <https://pvsol.software/en/>

Rachel Carnegie, D. G. (2013). Utility Scale Energy Storage Systems - Benefits, Applications, and Technologies.

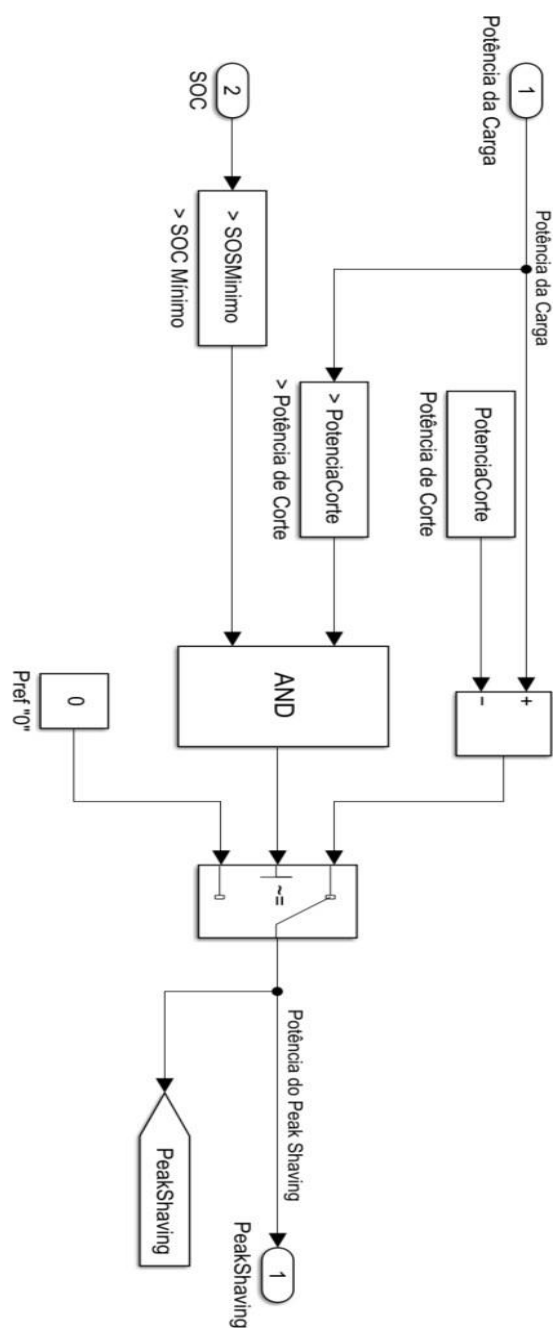
Shivashankar Sukumara, M. M. (2018). Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review. ELSEVIER - Journal of Energy Storage., pp. 218-229.

Silva, P. L. (21 de Dezembro de 2018). SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA UTILIZANDO BATERIA COM APLICAÇÃO PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA. Recife.

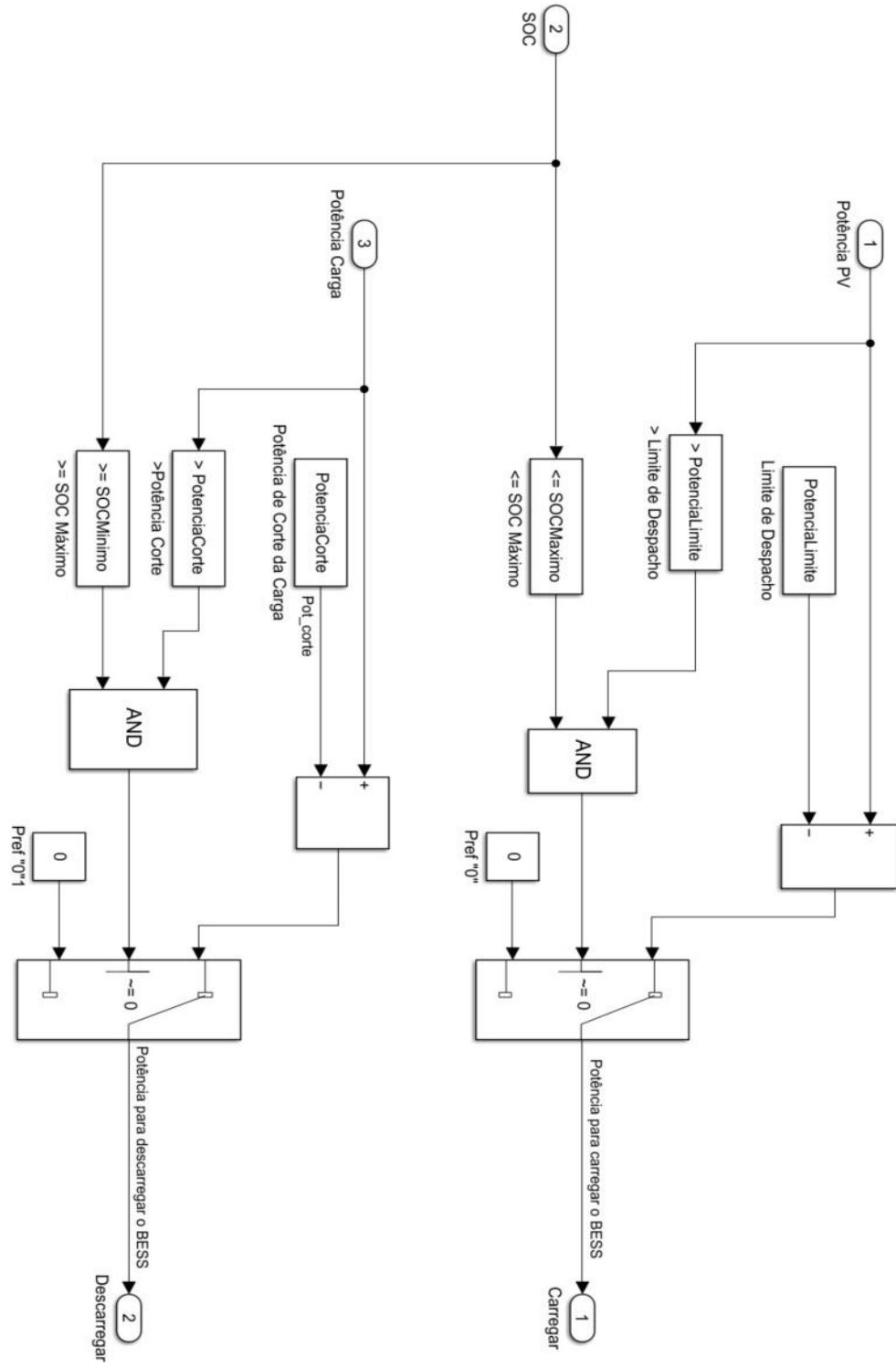
TAVARES, J. H. (2015). DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS. Porto.

Yongheng Yang, K. A. (2019). Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems. WOODHEAD PUBLISHING .

APÊNDICE A: MODO DE OPERAÇÃO *PEAK SHAVING*



APÊNDICE B: MODO DE OPERAÇÃO *SURPLUS ENERGY*



APÊNDICE C: MODO DE OPERAÇÃO RAMP RATE CONTROL

